

**Untersuchungen zur Reliabilität einer neuen
Quantitative Light-Induced Fluorescence basierten
Methode zur klinischen Erfassung von Plaque**

Inauguraldissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Glanz, Alexander Georg
aus Frankfurt am Main

Gießen 2018

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde
unter der Leitung von Prof. Dr. Bernd Wöstmann,
des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen

1. Gutachter: Prof. Dr. Carolina Ganß
2. Gutachter: Prof Dr. Jörg Meyle

Tag der Disputation: 07.03.2019

Für meine Familie.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Literaturübersicht	4
2.1	Plaque und orale Erkrankungen.....	4
2.2	Etablierte Methoden zur Quantifizierung von Plaque.....	8
2.2.1	Klinische Plaqueindizes	9
2.2.2	Planimetrische Verfahren	11
2.2.3	Gravimetrische Verfahren	13
2.3	Fluoreszenzmessung	13
2.3.1	Physikalische Grundlagen.....	13
2.3.2	Aktuelle Studienlage	15
3	Proband(inn)en, Materialien und Methoden	20
3.1	Studienziele und Abgrenzung	20
3.1.1	Struktur und Verantwortlichkeiten	20
3.1.2	Fragestellung	20
3.1.3	Flussdiagramm.....	22
3.2	Untersuchte Proband(inn)engruppe.....	24
3.3	Ein- und Ausschlusskriterien.....	24
3.4	Studienablauf	25
3.4.1	Untersuchertraining	25
3.4.2	Durchführung der Untersuchungen	25
3.5	Untersuchungsmethodik	27
3.5.1	Fotostatus	27
3.5.2	Professionelle Zahnreinigung.....	31
3.6	Auswertung	31
3.6.1	Planimetrische Auswertung der Fotos	31
3.6.2	Pseudonymisierung.....	37
3.6.3	Fallzahl.....	37
3.6.4	Zielkriterien und statistische Auswertung.....	37
3.7	Risiken	38
3.8	Ethikvotum und Datenschutz	39
4	Ergebnisse.....	40
4.1	Validierung der Methode	40
4.1.1	Reproduzierbarkeit	40

4.1.2	Mehrfachauswertungen.....	41
4.1.3	Leerwertbestimmung.....	42
4.2	Konventionelle Messung nach Anfärben.....	43
4.2.1	Gesamtbetrachtung.....	43
4.2.2	Auswertung nach Fläche.....	43
4.2.3	Auswertung nach Fläche und Kiefer	44
4.2.4	Auswertung nach Fläche, Kiefer und Zahn	44
4.3	Fluoreszenzmessung.....	46
4.3.1	Gesamtbetrachtung.....	46
4.3.2	Auswertung nach Fläche.....	46
4.3.3	Auswertung nach Fläche und Kiefer	47
4.3.4	Auswertung nach Fläche, Kiefer und Zahn	47
4.4	Übersichtsdiagramm	49
4.5	Vergleich der Methoden	50
4.5.1	Gesamtbetrachtung.....	50
4.5.2	Übereinstimmung bei eher niedriger Plaquebedeckung	54
5	Diskussion.....	56
5.1	Funktionsprinzip QLF und QLF-D	56
5.1.1	Software und Fototechnik	56
5.1.2	Studienkritik.....	58
5.2	Herkömmliche Indizes und planimetrische Verfahren.....	60
5.3	Methodenkritik.....	61
5.3.1	Studiendesign	61
5.3.2	Versuchsdurchführung	63
5.3.3	Datenverarbeitung und Auswertung.....	63
5.4	Interpretation der Ergebnisse.....	65
5.5	Schlussfolgerung und Ausblick	68
6	Zusammenfassung	72
7	Summary.....	73
8	Literaturverzeichnis	74
9	Anhang.....	81
9.1	Tabellarische Gesamtübersicht.....	81
9.2	Ablauf der planimetrischen Auswertung.....	91
9.3	Abbildungsverzeichnis	92
9.4	Tabellenverzeichnis	93

10 Ehrenwörtliche Erklärung	94
11 Danksagung	95

1 Einleitung

Karies und Parodontopathien sind plaqueassoziierte Erkrankungen und es ist unstrittig, dass die hinreichende Entfernung mikrobieller Beläge eine wichtige Maßnahme zur Gesunderhaltung oraler Strukturen ist [Loe et al., 1965]. Die quantitative Erfassung der Plaquemenge auf Zahnoberflächen ist nicht nur zur Motivation von Patient(inn)en, sondern auch zur Beantwortung von wissenschaftlichen Fragestellungen, etwa nach der Effektivität verschiedener Mundhygienetechniken oder plaquereduzierender Agentien, wichtig.

Zur Bestimmung der Plaquemenge auf Zahnoberflächen sind klinische Indizes etabliert, die den Biofilm in der Regel nach Anfärben in seiner Ausdehnung in Relation zu anatomischen Strukturen, etwa dem Approximalraum oder der Zervikalregion, bewerten [Fischman, 1986]. Mit diesen Verfahren kann die Plaquemenge auf allen Zahnflächen hinreichend reproduzierbar und reliabel erfasst werden [Quirynen et al., 1991]. Solche Indizes quantifizieren die Plaquemenge nicht linear, sondern die resultierenden Daten sind ordinal skaliert. Wesentliche Nachteile derartiger Verfahren sind, dass nach dem Anfärben der Zähne eine Zahnreinigung erforderlich ist, manche Plaquerevelatoren wie Erythrosin und Fluoreszin antibakterielle Wirkung zeigen [Baab et al., 1983; Begue et al., 1966; Caldwell und Hunt, 1969] und bei Methoden ohne Anfärben der Biofilm häufig beispielsweise durch Ausstreichen mit einer Sonde verändert wird. Daher ist in beiden Fällen ein Monitoring des Plaquewachstums problematisch. Weiterhin erfordern klinische Plaqueindizes mehr oder weniger aufwändige Verfahren zur Untersucherkalibrierung.

Neben klinischen Indizes finden auch planimetrische Verfahren zur Quantifizierung von Plaque Verwendung [Carter et al., 2004; Claydon und Addy, 1995; Quirynen et al., 1985; Sagel et al., 2000; Soder et al., 1993; Staudt et al., 2001]. Dabei erfolgt nach Anfärben der Plaque mit Revelatoren die Anfertigung standardisierter Fotos, welche durch Vergrößerung und Überlagerung mit einem Raster oder computergestützt mithilfe von Bildverarbeitungsprogrammen manuell oder automatisiert ausgewertet werden können. Solche Verfahren liefern genaue, gut reproduzierbare, verhältnisskalierte Daten. Von Nachteil ist, dass in der Regel nur gut zugängliche Areale des Zahnbogens betrachtet werden können. Außerdem ist auch bei diesen Verfahren meist ein Anfärben der Plaque notwendig, die Auswertungen sind zeitintensiv und spezielles Equipment wird benötigt. Eine weitere, eher selten angewandte Methode der Plaque-

messung stellen gravimetrische Verfahren dar, bei welchen die Plaque gesammelt und ihr Nass- oder Trockengewicht gemessen wird.

Alle Verfahren, die Anfärben, Ausstreichen oder ähnliche Eingriffe in den Biofilm erfordern, sind mit den beschriebenen Nachteilen behaftet. Idealerweise sollte eine Methode zur Bestimmung der Plaquemenge ohne Eingriffe in den Biofilm durchführbar und in allen Regionen des Zahnbogens anwendbar sein sowie in klinischen Settings schnell und automatisiert reproduzierbare, sensitive und verhältnisskalierte Ergebnisse liefern.

Erste Ansätze dazu sind Verfahren, welche die Autofluoreszenz des Biofilms nutzen. Orale Plaque zeigt nach Anregung mit Licht geeigneter Wellenlänge grünliche, orange-farbene oder rote Autofluoreszenz. Diese Eigenschaft wird auf bakterielle Porphyrine im Biofilm zurückgeführt. Dabei unterscheidet sich das Wellenlängenspektrum des emittierten Lichts bei verschiedenen Spezies [Coulthwaite et al., 2006; Koenig et al., 1993; Lennon et al., 2006; Pretty et al., 2005]. Die Intensität roter Fluoreszenz scheint positiv mit der Dicke, dem Alter und der Kariogenität der Plaque zu korrelieren [Lee et al., 2013; Volgenant et al., 2016a; Volgenant et al., 2012].

Quantitative Light-Induced Fluorescence (QLF; Inspektor Research, Amsterdam, Niederlande) basierte Verfahren sind zur Erfassung von De- und Remineralisierungsprozessen etabliert [van der Veen und de Josselin de Jong, 2000], können jedoch auch zur Plaquemessung eingesetzt werden [Heinrich-Weltzien et al., 2003; Pretty et al., 2005]. Kürzlich wurde Quantitative Light-Induced Fluorescence-Digital (QLF-D Biluminator; Inspektor Research, Amsterdam, Niederlande), ein neues System zur Fluoreszenzphotografie, entwickelt. Dabei kommen ein abgewandeltes Filtersystem, Licht modifizierter Wellenlänge zur Anregung der Fluoreszenz sowie eine veränderte Aufnahmeeinheit auf Basis eines digitalen Spiegelreflexkameragehäuses mit Makroobjektiv zum Einsatz. Dieses System soll die Darstellung der roten Fluoreszenz verstärken und wird als Hilfsmittel zur Prophylaxe und Prävention vermarktet, ist jedoch im Zusammenhang mit der Quantifizierung von Plaque, insbesondere außerhalb des Frontzahngebiets, bislang nur lückenhaft untersucht. Weiterhin beinhalten bisherige Untersuchungen häufig zusätzliche Arbeitsschritte wie das Anfärben von Plaque oder die manuelle Selektion angefärbter bzw. fluoreszierender Areale.

Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Entwicklung einer teilautomatisierten planimetrischen Auswertungsmethode, deren Anwendung bei standardisierten Fotos von Proband(inn)en ohne Multi-Bracket-Apparaturen im Rahmen eines gemeinsamen Projekts der Poliklinik für Zahnerhaltung und Präventive Zahnheilkunde und der Poliklinik

für Kieferorthopädie des Medizinischen Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen (siehe 3.1) sowie die statistische Auswertung und Interpretation der Ergebnisse.

2 Literaturübersicht

2.1 Plaque und orale Erkrankungen

Bei Zahnplaque handelt es sich um einen den Oberflächen der Mundhöhle anhaftenden mikrobiellen Belag (Biofilm). Plaque ist komplex strukturiert und besteht aus Mikroorganismen und einer Matrix aus bakteriellen sowie Speichelpolymeren [Marsh und Martin, 2003]. Wird Plaque nicht regelmäßig durch Mundhygienemaßnahmen entfernt, kann diese auf Grund quantitativer und qualitativer Veränderungen pathogene Wirkung auf die Gewebe der Mundhöhle ausüben. Insgesamt sind in der Mundhöhle 700 verschiedene Spezies bekannt, von denen einige mit der Entstehung oraler Erkrankungen wie Karies, Gingivitis und Parodontitis assoziiert sind [Aas et al., 2005]. Tabelle 1 (Seite 8) bietet eine Übersicht über die relevantesten Spezies. Von Plaque abzugrenzen ist die sog. *Materia alba* sowie Zahnstein. *Materia alba* ist definiert als gelblich oder gräulich-weiße unstrukturierte Ansammlung von Mikroorganismen, abgeschilfernten Epithelzellen, Leukozyten, Speichelproteinen, Lipiden und Nahrungsbestandteilen, welche den Schmelzoberflächen anhaftet. Die Adhäsion zwischen Zahnoberflächen und *Materia alba* ist deutlich schwächer als zwischen Zahnoberflächen und Plaque, sodass *Materia alba* mit Wasserspray entfernt werden kann. Bei Zahnstein handelt es sich um harte Auflagerungen, welche durch Mineralisierung von Plaque entstehen und üblicherweise von einer Schicht unmineralisierter Plaque bedeckt sind [Hinrichs, 2012].

Die Mundhöhle eines Neugeborenen ist zunächst steril. Mit der Geburt beginnt die selektive Besiedlung der Epithelien mit Keimen und es kommt zur Bildung einer residenten Bakterienflora. Pionierspezies sind dabei Streptokokken wie *Streptococcus salivarius*, *Streptococcus mitis* Biovar 1 und *Streptococcus oralis*. Später kommen gramnegative Anaerobier wie *Prevotella melaninogenica*, *Fusobacterium nucleatum* und *Veillonella spp.* hinzu [Marsh und Martin, 2003]. Dabei erfolgt die Besiedlung mit *Streptococcus mutans*, dem Leitkeim für die Entstehung von Karies, in der Regel durch Mutter-Kind-Übertragung [Li und Caufield, 1995].

Mit dem Durchbruch der Zähne in die Mundhöhle beginnt auch die Besiedlung der Schmelzoberflächen. Der Entstehung des Biofilmes geht dabei die Bildung eines azellulären proteinreichen Filmes, der sog. erworbenen Pellikel [Dawes et al., 1963], voraus. Darauf kommt es zunächst durch elektrostatische und van-der-Waals-Kräfte, später auch durch Interaktion von bakteriellen Adhäsinen mit Rezeptoren der Pellikel, zur Haftung einzelner Bakterien [Gibbons, 1989]. Die initiale Besiedlung erfolgt dabei

durch Streptokokken [Nyvad und Kilian, 1990] sowie zusätzlich durch Actinomyceten und gramnegative Bakterien wie Haemophili und Neisserien. Im Gegensatz zur früheren Annahme, *Streptococcus mutans* hätte großen Anteil an der initialen Mikroflora, wurde gezeigt, dass dieser maximal 2% der initialen Streptokokken ausmacht [Nyvad und Kilian, 1987]. Mit der Reifung der Plaque verschiebt sich das Verhältnis zunehmend zu Actinomyceten [Ritz, 1967; Syed und Loesche, 1978]. Dabei schaffen die Pionierspezies eine Umgebung, welche für sekundäre Besiedler attraktiv und für sie selbst auf Grund von Nährstoffmangel, inhibitorischen Stoffwechselprodukten und mit der Dicke des Biofilms zunehmender Anaerobität unattraktiv ist. Die Coaggregation sekundärer Besiedler erfolgt über Adhäsion-Rezeptor-Interaktionen [Kolenbrander, 2000].

Von Relevanz für die Entstehung von Karies sind säureproduzierende Spezies, zu welchen unter anderem grampositive Kokken wie *Streptococcus mutans* und *Streptococcus sobrinus* sowie grampositive Stäbchen (Laktobazillen, Actinomyceten) zählen. Ihnen gegenüber stehen anaerobe gramnegative Kokken und Veillonellen, welche Laktase zu schwächeren Säuren metabolisieren können, sowie Basen produzierende Bakterien wie *Streptococcus sanguinis*, *Streptococcus salivarius* und *Actinomyces naeslundii*. Mit steigendem Anteil und erhöhter metabolischer Aktivität säureproduzierender Spezies nehmen auch die Demineralisationsvorgänge an Zahnoberflächen zu, welche letzten Endes zur Entstehung von Karies führen können. *Streptococcus mutans* fällt dabei durch besonders kariogene Eigenschaften auf. Dieses Bakterium ist zum schnellen Transport fermentierbarer Zucker und deren Umwandlung zu Säuren sowie zur Produktion intra- und extrazellulärer Polysaccharide (IPS/EPS) befähigt, welche bei geringer Zuckerzufuhr als Energielieferanten genutzt werden und einen Teil der Matrix des Biofilms darstellen. Insbesondere die Fähigkeit, Protonen auch entgegen eines Konzentrationsgradienten auszuschleusen, und das Vorhandensein von Proteinen mit pH-Optimum im sauren Bereich befähigen *Streptococcus mutans* (wie auch Laktobazillen) dazu, den Zuckermetabolismus auch unter extremen Bedingungen aufrecht zu erhalten [Loesche, 1986].

Zur Beschreibung der Rolle von Plaque für die Entstehung von Karies wurden in der Vergangenheit bereits verschiedene Hypothesen aufgestellt. Dabei verbindet die zurzeit diskutierte sogenannte ökologische Plaquehypothese die beiden früheren Hypothesen, die spezifische und die unspezifische Plaquehypothese. Die ökologische Plaquehypothese besagt, dass Karies das Resultat einer durch Veränderung der Umweltbedingungen hervorgerufenen Verschiebung des bakteriellen Gleichgewichts im Biofilm ist, wobei mit Karies assoziierte Mikroorganismen auch an gesunden Stellen in

klinisch nicht relevanter Menge vorhanden sein können. Durch Veränderung der Umweltbedingungen wie einer häufigeren Aufnahme fermentierbarer Kohlenhydrate oder einer Abnahme des Speichelflusses wird ein saures Milieu und damit die Vermehrung säureproduzierender Spezies in der Plaque gefördert. Die Proliferation dieser Bakterien tritt insbesondere auf, wenn der pH-Wert länger unterhalb des kritischen Wertes von 5,5 liegt [Marsh, 1994; van Houte, 1994].

Voraussetzung für die Entstehung von Karies ist also die Bildung eines Biofilms durch orale Bakterien, welcher nicht regelmäßig durch Kauen, Attrition, Abrasion oder Mundhygienemaßnahmen entfernt oder in seiner Organisation gestört wird. Plaquebedeckung und Kariesfreiheit schließen sich jedoch nicht gegenseitig aus und so ist für Karies das Vorhandensein eines Biofilms eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung. Weitere Gegebenheiten wie die Zusammensetzung des Schmelzes, genetische und Umgebungsfaktoren (z.B. Speichelfließrate und -zusammensetzung, Aufnahme fermentierbarer Kohlenhydrate, Konzentration von Fluorid, Phosphat und Kalzium in der Mundhöhle) sind hierzu von Relevanz. Kommt es schließlich infolge metabolischer Aktivität im Biofilm zu einer Verschiebung des Gleichgewichtes hin zu Demineralisationsvorgängen an der Zahnoberfläche, führt dies zur sukzessiven Zerstörung von Schmelz und Dentin und damit zur Entstehung einer kariösen Läsion [Fejerskov et al., 2008; Fejerskov und Manji, 1990].

Eine weitere durch Plaque verursachte Erkrankung ist die plaqueassoziierte Gingivitis, welche die häufigste gingivale Erkrankung darstellt [Hinrichs und Novak, 2012]. Dabei handelt es sich um eine aus pathologischen Veränderungen in der Gingiva resultierende klinisch sichtbare Entzündung. Diese wird durch Toxine, welche von am Zahn oder nahe des gingivalen Sulkus anhaftenden Bakterien ausgeschieden werden, ausgelöst [Fiorellini et al., 2012]. Es wurde gezeigt, dass sich nach zehn bis 21 Tagen ungestörter Plaqueakkumulation eine klinisch manifeste Gingivitis einstellt. Mit zunehmender Gesamtmenge und Reife der Plaque wurde dabei eine Veränderung der anfangs fast vollständig aus grampositiven Kokken und Stäbchen bestehenden Bakterienflora beobachtet, bei welcher zunächst Filamente und später auch Vibrionen, Spirochäten und gramnegative Kokken in großen Anteilen vertreten waren. Bei Wiederaufnahme geeigneter Mundhygienemaßnahmen stellte sich eine Remission der Erkrankung unter Wiederherstellung der initialen Bakterienflora ein [Loe et al., 1965]. Aus einer chronischen Gingivitis kann sich unter bestimmten Umständen eine chronische Parodontitis entwickeln. Zwar unterscheidet sich die Bakterienflora bei plaqueassoziiierter Gingivitis von der subgingivalen Flora bei chronischer Parodontitis, doch die meisten mit chronischer Parodontitis assoziierten Keime sind, wenn auch in geringer

Anzahl, bereits vorhanden [Teughels et al., 2012]. In einer Studie, bei welcher Mundhygiene- und Parodontalparameter sri-lankischer Teeplantagenarbeiter/-innen unter Absenz jeglicher Präventionsmaßnahmen oder Mundhygieneinstruktionen über einen Zeitraum von 15 Jahren gemessen wurden, wurde bei allen Proband(inn)en eine chronische Gingivitis diagnostiziert. Weiterhin zeigten über den Zeitraum der Untersuchungen 8% der Proband(inn)en eine stark und 81% eine mäßig fortschreitende Parodontitis, während bei nur 11% der Proband(inn)en keine Parodontitis auftrat [Loe et al., 1986]. Ferner wurde im Tierversuch an Beagle-Hunden gezeigt, dass sich bei Verzicht auf Mundhygienemaßnahmen innerhalb von 15 Monaten bzw. vier Jahren zunächst eine Gingivitis und schlussendlich bei fast allen Versuchstieren eine Parodontitis einstellte. Bei der Kontrollgruppe, in welcher die Zähne professionell gereinigt wurden, traten hingegen keinerlei Veränderungen der Gingiva auf [Lindhe et al., 1973; Lindhe et al., 1975]. Wesentliche Faktoren für den Übergang zur chronischen Parodontitis sind unter anderem die Menge parodontalpathogener Keime wie *Aggregatibacter actinomycetemcomitans*, *Tannerella forsythia* und *Porphyromonas gingivalis*, das Ausmaß der Wirtsreaktion sowie die persönliche Prädisposition in Form von Umwelt- und genetischen Faktoren [Teughels et al., 2012].

Die Relevanz klinischer Plaquekontrolle für die Prävention und die Behandlung oraler Erkrankungen ist daher offensichtlich. Es wurde gezeigt, dass das tägliche Zähneputzen mit fluoridhaltiger Zahnpasta ursächlich für die Abnahme der Kariesinzidenz seit 1970 ist [Marthaler, 1990]. Zahnzwischenraumpflege mittels Zahnseide senkt, wenn diese professionell durchgeführt wird, die Inzidenz von Approximalkaries signifikant [Wright et al., 1980]. De facto sind jedoch perfekt gereinigte Schmelzoberflächen nach Anwendung habituellder Mundhygiene selten anzutreffen [Frandsen, 1986]. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer anschaulichen und im klinischen Alltag anwendbaren Methode zur visuellen Darstellung der Plaque als Hilfsmittel in der Prophylaxe.

Tabelle 1: Übersicht wichtiger Mikroorganismen in der Mundhöhle [Hellwig et al., 2013]

	Grampositiv (+)		Gramnegativ (-)	
	Fakultativ anaerob	Anaerob	Fakultativ anaerob	Anaerob
Kokken	<i>Streptococcus</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>S. mutans</i> • <i>S. sanguis</i> • <i>S. salivarius</i> • <i>S. milleri</i> • <i>S. mitis</i> • <i>S. intermedius</i> <i>Stomatococcus</i>	<i>Peptostreptococcus</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>P. micros</i> 	<i>Neisseria</i>	<i>Veillonella</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>V. parvula</i>
Stäbchen	<i>Actinomyces</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>A. naeslundii</i> • <i>A. viscosus</i> <i>Corynebacterium</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>C. matruchotii</i> <i>Rothia</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>R. dentocariosa</i> <i>Lactobacillus</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>L. acidophilus</i> • <i>L. casei</i> 	<i>Actinomyces</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>A. israelii</i> • <i>A. odontolyticus</i> <i>Eubacterium</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>E. nodatum</i> <i>Propionibacterium</i>	<i>Aggregatibacter</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>A. actinomycetem-comitans</i> <i>Capnocytophaga</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>C. ochracea</i> • <i>C. sputigena</i> • <i>C. gingivalis</i> <i>Eikenella</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>E. corrodens</i> <i>Haemophilus</i>	<i>Porphyromonas</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>P. gingivalis</i> • <i>P. endodontalis</i> <i>Tannerella</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>T. forsythia</i> <i>Prevotella</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>P. intermedia</i> • <i>P. nigrescens</i> • <i>P. melaninogenica</i> <i>Fusobacterium</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>F. nucleatum</i> <i>Leptotrichia</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>L. buccalis</i> <i>Campylobacter</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>C. rectus</i> <i>Selenomonas</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>S. sputigena</i>
Spirochäten und weitere Mikroorganismen				
Nicht klassifizierte Spirochäten, <i>Mycoplasma</i> , <i>Trichomonas</i> , <i>Candida</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>C. albicans</i> 				<i>Treponema</i> <ul style="list-style-type: none"> • <i>T. sokranskii</i> • <i>T. denticola</i> • <i>T. pectinovorum</i>

2.2 Etablierte Methoden zur Quantifizierung von Plaque

Um die Plaquemenge auf Zahnoberflächen quantitativ zu erfassen sind verschiedene Methoden gebräuchlich. Diese umfassen klinische Indizes, planimetrische Verfahren sowie gravimetrische Verfahren. Während sich klinische Indizes in der Regel auf direkte visuelle Inspektion der Zahnflächen beziehen, erfolgt bei planimetrischen Verfahren die Auswertung anhand zuvor angefertigter Fotografien der Zahnflächen. Gravimetrischen Verfahren basieren auf der Ermittlung des Nass- oder Trockengewichts der Plaque. Bei den genannten Verfahren ist häufig die Visualisierung der Plaque mit Hilfe sogenannter Plaquerevelatoren notwendig.

2.2.1 Klinische Plaqueindizes

Verschiedene klinische Plaqueindizes haben sich zur Beurteilung der Plaquequalität und -quantität im Rahmen von Studien sowie in der Prophylaxe zur Einschätzung der individuellen Mundhygiene etabliert. Ein Plaqueindex sollte hauptsächlich quantitative, möglichst aber auch qualitative Aussagekraft, eine hohe Sensitivität/Spezifität sowie einen hohen positiven/negativen Vorhersagewert haben und gut reproduzierbar sein. Wichtig ist auch eine praxistaugliche Handhabung und Auswertbarkeit, um den Anforderungen des klinischen Alltags gerecht zu werden [Hellwig et al., 2013]. Bei der Planung klinischer Studien sollten zur Auswahl eines geeigneten Plaqueindexes die Studienziele, die Gruppengröße, der Zeitraum sowie Art und Umfang der erwarteten Veränderungen berücksichtigt werden [Fischman, 1986].

Im Folgenden werden exemplarisch einige etablierte klinische Plaqueindizes vorgestellt.

T-QHI-Plaqueindex

Der von Turesky modifizierte Plaqueindex nach Quigley und Hein (T-QHI) zeigt eine Differenzierungsstärke, welche nahezu das Niveau planimetrischer Auswertungsmethoden erreicht [Quirynen et al., 1991] und findet daher sowohl in Studien als auch im klinischen Alltag häufig Anwendung.

Vor der Beurteilung der Plaquemenge werden die Zähne mit einem Plaquerevelator angefärbt. Danach wird die Plaque an allen Zähnen oral und vestibulär beurteilt. Es werden sechs Grade unterschieden (Abbildung 1) [Turesky et al., 1970].

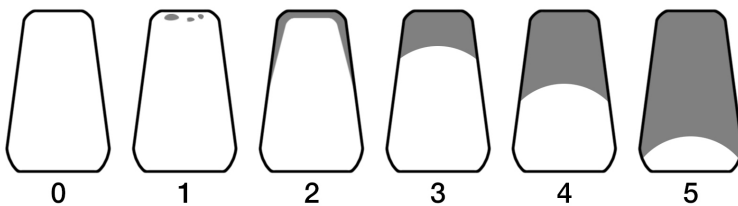


Abbildung 1: Grade des T-QHI

- Grad 0: keine Plaque
- Grad 1: Plaqueinseln im zervikalen Randbereich des Zahnes
- Grad 2: dünnes, kontinuierliches Plaqueband (bis zu 1 mm breit) am zervikalen Rand
- Grad 3: mehr als 1 mm breites Plaqueband, das weniger als ein Drittel der Zahnkrone bedeckt

- Grad 4: Plaque, die mehr als ein Drittel, aber weniger als zwei Drittel der Zahnkrone bedeckt
- Grad 5: Plaque, die zwei Drittel der Zahnkrone oder mehr bedeckt

Der Index-Wert wird durch Berechnung des arithmetischen Mittelwertes der Grade aller beurteilbaren Flächen einer Person gebildet.

Plaqueindex nach Silness und Loe

Der Plaqueindex nach Silness und Loe wird üblicherweise an den Zähnen 16, 12, 24, 36, 32 und 44 erhoben, sofern diese vorhanden sind. Vor der Beurteilung ist der Zahn vorsichtig mit Druckluft zu trocknen. Folgende Grade werden unterschieden:

- Grad 0: keine Plaque
- Grad 1: an Zahnfleischrand und angrenzender Zahnoberfläche haftender Plaquefilm, mit zahnärztlicher Sonde ablösbar oder nach Anfärben sichtbar
- Grad 2: moderate Ansammlung weicher Beläge in der Zahnfleischtasche, am Zahn oder am Zahnfleischrand, welche mit bloßem Auge erkennbar ist
- Grad 3: reichlich weiches Material in der Zahnfleischtasche, am Zahn oder am Zahnfleischrand

Der Grad ist an vier Stellen pro Zahn (vestibulär, oral, mesial und distal) zu erheben und als Index für den jeweiligen Zahn durch 4 zu dividieren. Der Gesamtindex einer Person ergibt sich durch Berechnung des arithmetischen Mittelwertes der Grade aller Messstellen [Silness und Loe, 1964].

Simplified Oral Hygiene Index nach Greene und Vermillion

Der Simplified Oral Hygiene Index (OHI-S) nach Greene und Vermillion beinhaltet die separate Bewertung weicher und harter Beläge. Dabei werden jeweils vier Grade unterschieden (Abbildung 2).

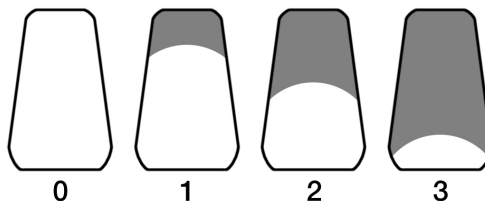


Abbildung 2: Grade des OHI-S

Bewertung weicher Beläge (Simplified Debris Index DI-S):

- Grad 0: keinerlei Bedeckung feststellbar
- Grad 1: weniger als ein Drittel der Zahnkrone bedeckt
- Grad 2: mehr als ein Drittel, aber weniger als zwei Drittel der Zahnkrone bedeckt
und/oder Vorhandensein extrinsischer Verfärbungen
- Grad 3: zwei Drittel der Zahnkrone oder mehr bedeckt

Bewertung harter Beläge (Simplified Calculus Index CI-S):

- Grad 0: keinerlei Bedeckung feststellbar
- Grad 1: weniger als ein Drittel der Zahnkrone bedeckt
- Grad 2: mehr als ein Drittel, aber weniger als zwei Drittel der Zahnkrone bedeckt
und/oder Vorhandensein subgingivalen Zahnsteins
- Grad 3: zwei Drittel der Zahnkrone oder mehr bedeckt

Der Index wird jeweils am ersten Zahn distal des zweiten Prämolaren (in der Regel der erste Molar), im Oberkiefer von vestibulär und im Unterkiefer von oral; sowie an den Zähnen 11 und 31 von vestibulär erhoben. Bei Fehlen von Zahn 11 wird Zahn 21; bei Fehlen von Zahn 31 stattdessen Zahn 41 bewertet. Insgesamt werden maximal sechs Flächen bewertet. Zur Berechnung sollten mindestens zwei beurteilbare Flächen vorhanden sein. Der OHI-S einer Person ergibt sich schlussendlich durch Addition der Mittelwerte des DI-S und des CI-S [Greene und Vermillion, 1964].

Approximalraum-Plaquesindex nach Lange et al.

Zunächst werden die Zähne mit einem Plaquerevelator angefärbt. Daraufhin erfolgt die Beurteilung aller Approximalräume, wobei nur zwischen Vorhandensein und Nichtvorhandensein von Plaque unterschieden wird. Der Approximalraum-Plaquesindex (API) errechnet sich wie folgt:

$$API = \frac{\text{Summe der Approximalräume mit Plaque}}{\text{Summe der untersuchten Approximalräume}} * 100$$

Dabei erfolgt die Beurteilung im ersten und dritten Quadranten von oral und im zweiten und vierten Quadranten von vestibulär [Lange et al., 1977].

2.2.2 Planimetrische Verfahren

Eine Alternative zu klinischen Plaquesindizes stellen planimetrische Verfahren dar. Diese ermöglichen die verhältnisskalierte Angabe der Plaquesbedeckung einer Fläche in

Prozent. Es konnte gezeigt werden, dass planimetrische Verfahren anhand von vergrößert projizierten Farbdias unter Verwendung eines Planimeters größere Differenzierungsstärke als klinische Indizes besitzen [Quirynen et al., 1991]. Weiterhin wurde festgestellt, dass die computergestützte planimetrische Plaquemessung in Hinblick auf Reproduzierbarkeit selbst bei größeren fotografischen Abweichungen, z.B. hinsichtlich des Aufnahmewinkels oder des Abstandes, sehr gute Ergebnisse erzielt [Soder et al., 1993].

Zur planimetrischen Quantifizierung der Plaquebedeckung wurden in der Vergangenheit verschiedenste Verfahren entwickelt und evaluiert. So basieren frühe planimetrische Verfahren auf der Analyse vergrößerter, projizierter [Quirynen et al., 1985] oder gedruckter [Ahrens, 1973] Fotografien von Vestibulärflächen nach manuellem Nachzeichnen der Konturen von Zähnen, Gingivalrand, Papillen und plaquebedeckten Bereichen mithilfe eines mechanischen Planimeters oder durch Projektion der Fotos auf einen Analog-Digital-Wandler mit nachfolgender Flächenberechnung [Rekola und Scheinin, 1977]. Auch erfolgten bereits Versuche zur planimetrischen Auswertung angefärbter Plaque anhand von Schwarzweißfotografien, indem nach Beleuchtung mit gelb-orangerfarbenem Licht mithilfe eines Bildanalyse-Computers Graustufenwerte unterschieden wurden. Auch hier war ein Nachzeichnen der Zähne und der plaquebedeckten Bereiche notwendig [Verran und Roccliffe, 1986]. Weitere Versuche beinhalteten das computergestützte manuelle Nachzeichnen plaquebedeckter Oberflächen nach Digitalisierung analog angefertigter Fotografien unter Verwendung von NIH Image (Research Services Branch of the National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA) [Soder et al., 2003; Soder et al., 1993], der Vorläufersoftware des in der vorliegenden Arbeit verwendeten ImageJ (Wayne Rasband, Research Services Branch of the National Institute of Mental Health, Bethesda, Maryland, USA). Ein anderer Ansatz zur Erzeugung eines möglichst großen Kontrasts zwischen Plaque und Zahnoberflächen beinhaltete das Anfärben von Plaque mit Fluorescein und anschließender Fotografie unter Beleuchtung mit langwelliger Ultraviolettstrahlung [Block et al., 1996]. Sagel et al. griffen dieses Verfahren auf und entwickelten eine computergestützte Analysemethode zur automatisierten farbbasierten Unterscheidung zwischen Zahnoberflächen, Gingiva, Plaque auf Zahnoberflächen, Plaque auf Gingiva und der Oberfläche des verwendeten Lippenretraktors unter Verwendung des RGB-Farbraumes. Dabei nutzten sie einen ähnlichen Versuchsaufbau wie in der vorliegenden Studie. Das Verfahren wurde allerdings nur bei Aufnahmen der Frontzähne von vestibulär eingesetzt und es wurde auf eine Auswertung einzelner Zahnflächen verzichtet [Sagel et al., 2000]. Im Gegensatz zu den meisten anderen Studien, welche nur direkt einsehbare Areale der Mundhöhle betrachteten, untersuchten Staudt et al. mit-

hilfe computergestützter Planimetrie unter Verwendung einer intraoralen CCD-Kamera Oraflächen von Unterkieferprämolaren und -molaren; aber auch hier erfolgte die Markierung der Zähne und der Plaque manuell durch den Untersucher [Staudt et al., 2001]. Carter et al. favorisierten zur automatisierten computergestützten planimetrischen Erkennung von Plaque den HSI-Farbraum, verzichteten aber wie Sagel et al. auf eine Auswertung pro Zahn [Carter et al., 2004]. Smith et al. nutzten zur digitalen Bildanalyse unter manueller Selektion der Zähne und anschließender farbmetrischer Erkennung der Plaque ein ähnliches Konzept wie in der vorliegenden Arbeit, welches allerdings auf automatisierte Arbeitsabläufe verzichtet [Smith et al., 2001].

2.2.3 Gravimetrische Verfahren

Bei gravimetrischen Verfahren wird Plaque mit Hilfe von zahnärztlichen Sonden oder ähnlichen Instrumenten entnommen und vor oder nach Evaporation gewogen. Derartige Verfahren erlauben genaue Aussagen über die Quantität der Plaque, denn die erhobenen Daten sind absolut skaliert. Es wurde gezeigt, dass eine Übereinstimmung zwischen der Bewertung von Plaque anhand ihres Gewichts und der Bewertung anhand klinischer Indizes besteht. Auf Grund des hohen klinischen und apparativen Aufwandes finden gravimetrische Verfahren nur selten Anwendung [Claydon et al., 2004; Mander und Mainwaring, 1980; McCracken et al., 2006].

2.3 Fluoreszenzmessung

Im Folgenden soll das Prinzip der Fluoreszenzmessung unter besonderer Betrachtung der Funktionsweise von Quantitative Light-Induced Fluorescence (-Digital) erläutert werden.

2.3.1 Physikalische Grundlagen

Die Fluoreszenz dentaler Plaque basiert auf der besonderen Eigenschaft einiger Bakterien Porphyrine auszusecheiden, deren Chromophore bei Beleuchtung mit bläulich-violettfarbenem Licht ($< 410 \text{ nm}$) rote Autofluoreszenz zeigen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Protoporphyrin IX (PpIX). Dieses wird beispielsweise von *Porphyromonas gingivalis* und *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* synthetisiert [Fyrestam et al., 2015]. PpIX hat ein Absorptionsmaximum bei 405 nm und zeigt Fluoreszenz im rötlichen Spektrum mit Emissionsmaxima bei 635 nm und 705 nm [Valentine et al., 2013]. Dies wird auch zur Abgrenzung bei der operativen Entfernung bestimmter bösartiger Tumoren wie beispielsweise des Glioblastoms genutzt. Dazu erfolgt präoperativ

die Gabe von 5-Aminolävulinsäure (5-ALA), welche in Tumorzellen zu PpIX verstoffwechselt wird [Stummer et al., 2006]. Bereits 1993 konnten Koenig et al. Protoporphyrin IX als für rote Autofluoreszenz maßgeblich identifizieren und bei Mikroorganismen wie *Candida albicans*, *Proteus*, *Bacteroides* und *Pseudomonas aeruginosa* nachweisen, wohingegen den mit Karies assoziierten *Streptococcus mutans* und Laktobazillen in dieser Untersuchung keine Autofluoreszenz nachgewiesen werden konnte [Koenig et al., 1998; Koenig et al., 1993]. In-vitro-Studien zeigen, dass Bakterien in Monokulturen geringere Autofluoreszenz als bei Vorhandensein weiterer oralpathogener Bakterien aufweisen. Beispielsweise zeigt *Porphyromonas gingivalis* isoliert nur schwache und *Peptostreptococcus micros* gar keine Autofluoreszenz. Bei gemeinsamer Anzüchtung hingegen zeigt *Peptostreptococcus micros* sehr deutliche Autofluoreszenz [van der Veen et al., 2006]. Weiterhin wurde den Spezies *Actinomyces odontolyticus*, *Bacteroides intermedius* und *Pseudomonas aeruginosa* deutliche Autofluoreszenz nachgewiesen [Koenig et al., 1993].

Das Prinzip von Quantitative Light-Induced Fluorescence basiert auf der Nutzung der beschriebenen Fluoreszenzphänomene auf plaquefreier Zahnhartsubstanz und in Plaque. Diese werden durch Beleuchtung der Oberflächen mit einem Argon-Ionen-Laser, dessen Licht eine Wellenlänge von 488 nm aufweist, ausgelöst. Das Licht gelangt dabei zunächst durch einen 370 nm-Bandpassfilter und hat nach Durchlaufen eines Lichtleiters ins Handstück ein Wellenlängenmaximum bei 405 nm. Die Aufnahme der durch diese Beleuchtung emittierten Fluoreszenzphotonen erfolgt nach Durchstrahlung eines Gelbfilters, dessen Grenzwellenlänge ($\lambda \geq 520$ nm) der Wellenlänge der im Dentin emittierten Fluoreszenzphotonen entspricht [Angmar-Mansson und ten Bosch, 2001; de Josselin de Jong et al., 1995]. In gesunder Zahnhartsubstanz können die Photonen durch den Schmelz und über die Schmelz-Dentin-Grenze hinaus bis ins Dentin gelangen, wo die Wahrscheinlichkeit einer Absorption durch einen Fluorophor unter nachfolgender Emission eines Fluoreszenzphotons stark ansteigt. Trifft das Photon jedoch innerhalb des Zahnschmelzes auf eine kariöse Initialläsion, verringert sich der Transmissionsgrad auf Grund des innerhalb der Läsion um den Faktor 5-10 erhöhten Lichtstreuungskoeffizienten drastisch. Dadurch nimmt die Wahrscheinlichkeit einer Absorption des Photons ab und White-Spots sind als dunkle Areale auf der lumineszierenden Schmelzoberfläche erkennbar. Durch sich in Hinblick auf Intensität und Färbung unterscheidende Autofluoreszenz lassen sich unter anderem Informationen über das Vorhandensein kariöser Läsionen, insbesondere der klinisch nicht immer zweifelsfrei diagnostizierbaren sog. White-Spots (Initialläsionen), sowie über die Bedeckung der Zahnoberfläche mit Plaque gewinnen [Angmar-Mansson und ten Bosch, 2001; van der Veen und de Josselin de Jong, 2000].

Quantitative Light-Induced Fluorescence-Digital stellt eine Weiterentwicklung von QLF zur besseren Darstellung dentaler Plaque in vivo dar. Hier werden als Lichtquelle Lumineszenzdioden, welche Photonen im Wellenlängenbereich von 400–405 nm emittieren, benutzt. Zusätzlich wird ein Bandpassfilter eingesetzt, um ausschließlich violett-farbenes Licht von 405 nm Wellenlänge zu erhalten. Zur besseren Darstellung und Quantifizierbarkeit erfolgt die Aufnahme mittels eines digitalen Spiegelreflexkameras (EOS 550D; Canon, Tokio, Japan) mit Makro-Objektiv (EF-S 60 mm f2.8 Macro USM; Canon, Tokio, Japan) unter Verwendung eines eigens entwickelten Filters zur optimierten Darstellung des roten Fluoreszenzspektrums (D007; Inspektor Research Systems BV, Amsterdam, Niederlande) [Hope et al., 2011].

Die Autofluoreszenz multibakterieller Plaque ist mittels QLF-D bereits nach zwei Tagen messbar und nimmt offenbar mit zunehmender Reife, Dicke und Kariogenität zu. Ein Maximum wird dabei nach sieben Tagen erreicht [Kim et al., 2014; Lee et al., 2013; Volgenant et al., 2016a; Volgenant et al., 2012]. Durch diese Eigenschaften könnte QLF-D als Hilfsmittel zur Ermittlung und Illustration des Hygienestatus insbesondere bei Personengruppen mit hohem Kariesrisiko von Nutzen sein.

2.3.2 Aktuelle Studienlage

Es sind bereits verschiedene In-vitro- und In-vivo-Untersuchungen zum Themenkomplex der Autofluoreszenz oraler Mikroorganismen durchgeführt worden, welche im Folgenden vorgestellt werden.

In-vitro-Studien

Heinrich-Weltzien et al. zeigten, dass die mittels QLF messbare Fluoreszenz auf Porphyrine, welche von Mikroorganismen der Plaque metabolisiert werden, zurückzuführen ist [Heinrich-Weltzien et al., 2003]. Zusätzlich konnten Fyrestam et al. bei *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* und *Porphyromonas gingivalis* Protoporphyrin IX und weitere Porphyrine identifizieren [Fyrestam et al., 2015]. Auch konnte Autofluoreszenz bei vorwiegend dem Gingivalrand anhaftenden anaeroben Spezies wie *Actinomyces odontolyticus*, *Actinomyces gerencseriae* und *Lactobacillus acidophilus* nachgewiesen werden, während *Peptostreptococcus micros* nur bei gleichzeitigem Vorhandensein von *Porphyromonas gingivalis* rote Autofluoreszenz zeigte [van der Veen et al., 2006].

Coulthwaite et al. stellten bei der Analyse von auf Prothesen Autofluoreszenz zeigender Plaque fest, dass frühe Besiedler wie Streptokokken und *Fusobacterium nuclea-*

tum eher grünliche und sekundäre Besiedler wie die obligaten bzw. fakultativen Anaerobier *Prevotella melaninogenica* und *Actinomyces israelii* sowie weiterhin *Candida albicans* eher rötliche bzw. orangefarbene Fluoreszenz zeigten [Coulthwaite et al., 2006]. Weiterhin wiesen auch Lennon et al. für *Streptococcus oralis*, *Streptococcus salivarius*, *Streptococcus mutans*, *Fusobacterium nucleatum* und *Streptococcus sobrinus* eher dem grünlichen sowie hauptsächlich für *Prevotella intermedia* und weiterhin für *Actinomyces naeslundii*, *Actinomyces israelii*, *Lactobacillus fermentans*, *Lactobacillus rhamnosus* und *Lactobacillus casei* eher dem rötlichen Spektrum zuzuordnende Autofluoreszenz nach. Daher ist rote Autofluoreszenz eher als Indikator für an aktiver Dentinkaries beteiligte Spezies und weniger für an Initialläsionen angesiedelte Streptokokken geeignet. Die Erkennbarkeit grünlicher Autofluoreszenz ist wegen der Ähnlichkeit zur natürlichen Fluoreszenz der gesunden Zahnoberfläche in vivo eingeschränkt [Lennon et al., 2006].

Lee et al. zeigten, dass es bei Anzüchtung von Plaque auf bovinen Schmelzschnitten unter Zufuhr von Saccharoselösung steigender Konzentration zu einer Verschiebung von grünlicher zu rötlicher Autofluoreszenz kommt. Der Zusammenhang zwischen rötlicher Autofluoreszenz und kariogenen Eigenschaften der Plaque in Form eines zunehmenden Anteils säureproduzierender Bakterien unter Abnahme des pH-Wertes und der Mikrohärtigkeit der Schmelzoberflächen war signifikant. Dies spricht dafür, dass für die Autofluoreszenz von Plaque neben dem Vorhandensein bestimmter Spezies auch die metabolische Aktivität und folglich die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen oralen Mikroorganismen von Relevanz sind [Lee et al., 2013]. Auch Kim et al. untersuchten auf Schmelzblöcken unter Saccharosesubstitution angezüchteten hochkariogenen Biofilm. Dabei war nach drei Tagen rote Autofluoreszenz mittels QLF-D messbar, deren Intensität nach siebentägiger Zunahme ein Plateau erreichte [Kim et al., 2014]. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch Volgenant et al., welche auf Dentinscheiben Mikroorganismen eines Spenders unter täglich drei- bzw. achtfacher Saccharosesubstitution kultivierten. Dabei wurde nach 7 Tagen erstmals auftretende rote Fluoreszenz beobachtet, deren Intensität im Verlauf mäßig bzw. nicht weiter zunahm und erst nach 24 Tagen einen deutlichen Anstieg zeigte. Eine häufigere Saccharosesubstitution führte dabei zu zunehmender Fluoreszenz. Weiterhin konnte ein Zusammenhang zwischen der Intensität der Fluoreszenz, der Dicke des Biofilms und dem Mineralverlust des Dentins, welcher als Indikator für die Kariogenität des Biofilms zu werten ist, aufgezeigt werden [Volgenant et al., 2016a].

Ferner wurden deutliche Unterschiede bezüglich der Intensität der Autofluoreszenz kariesassoziiierter Spezies wie *Streptococcus mutans*, *Lactobacillus salivarius* und

Bifidobacterium dentium in Abhängigkeit von der dem Kulturmedium zugesetzten Nährstoffkombination festgestellt [Volgenant et al., 2013; Volgenant et al., 2012].

In-vivo-Studien

Bei einer von Pretty et al. durchgeführten Pilotstudie verzichtete eine Person für drei Tage auf jegliche Mundhygienemaßnahmen. Daraufhin wurden Fluoreszenzfotos vor und nach Anfärben mit einem Plaquerevelator angefertigt. Es konnte ein schwacher Zusammenhang zwischen den Bedeckungsgraden vor und nach Anfärben gezeigt werden, wobei vor Anfärben generell geringere Bedeckungsgrade gemessen wurden. Die Standardabweichung bei wiederholter Messung war gering [Pretty et al., 2005].

Im Rahmen einer von Bittar et al. durchgeführten Studie wurden bovine Schmelzproben mithilfe palatinaler Apparaturen intraoral von Probanden getragen. Die Proben wurden achtmal täglich in der Experimentalgruppe mit zwanzigprozentiger Saccharoselösung benetzt, während in der Kontrollgruppe destilliertes Wasser verwendet wurde. Nach vier, sieben, zehn und 14 Tagen wurden Fluoreszenzmessungen durchgeführt, wobei in beiden Gruppen die Intensität der Fluoreszenz signifikant zunahm. Allerdings konnte nur in der Kontrollgruppe ein signifikanter Mineralverlust nachgewiesen werden. Daraus lässt sich schließen, dass zwar ein Zusammenhang zwischen der Reife von Plaque und roter Fluoreszenz besteht, diese aber nicht zwangsläufig mit einer erhöhten Kariogenität einhergeht [Bittar et al., 2014].

Sadeq et al. konnten bei Probanden während einjähriger Behandlung mit festsitzenden kieferorthopädischen Apparaturen keinen Zusammenhang zwischen roter Autofluoreszenz und dem Auftreten von kariösen Initialläsionen nachweisen. Die White-Spots waren durch Inspektion nicht zu erkennen, vielmehr erfolgte ihre Detektion mit Hilfe von QLF-D und die Messung der Fluoreszenz durch Toothcare™ (Inspektor Research Systems BV, Amsterdam, Niederlande) [Sadeq et al., 2015].

In einer von Han et al. durchgeführten Studie wurden bei 50 Probanden, nachdem diese für vier Stunden auf Zähneputzen und Nahrungsaufnahme verzichtet hatten, insgesamt 600 Vestibulärflächen von Front- und Eckzähnen mittels QLF-D untersucht. Dabei zeigte sich eine moderate Korrelation zwischen konventionellen Plaqueindizes und anhand von Fluoreszenzfotos bestimmter prozentualer Plaquebedeckung der Zahnflächen (T-QHI-Plaqueindex: $r_s = 0,48$, Plaqueindex nach Silness und Loe: $r_s = 0,51$; $p \leq 0,01$). Weiterhin zeigte der Vergleich von Fluoreszenzfotos mit konventionellen Fotos nach Anwendung eines zweifarbigen Plaquerevelators eine signifikante Übereinstimmung fluoreszierender Areale mit blau gefärbten Arealen nach Anfärben, wel-

che mit reifer Plaque assoziiert sind. Während die Fluoreszenzfotos mit der dem QLF-D Biluminator beiliegenden Analysesoftware QA2 (vgl. 5.1) ausgewertet wurden, erfolgte die Analyse der konventionellen Fotos mittels eines manuellen Arbeitsablaufes unter Verwendung der Software Image-ProPLUS (Media Cybernetics, Rockville, Maryland, USA). Durch mikrobiologische Analysen konnten *Prevotella intermedia* und *Streptococcus anginosus* in stark fluoreszierender Plaque nachgewiesen werden, während *Streptococcus mutans* und *Lactobacillus casei* sowohl in stark als auch in schwach fluoreszierender Plaque dokumentiert werden konnten [Han et al., 2015, 2016].

Van der Veen et al. untersuchten bei 41 Probanden mittels QLF-D die rote Fluoreszenz von Front- und Eckzähnen während zweiwöchigem Verzicht auf Mundhygiene. Dabei wurden die prozentuale Plaquebedeckung und der T-QHI-Plaueindex anhand von Fluoreszenzfotos bestimmt. Die Messungen erfolgten nach zwei, fünf, neun und 14 Tagen, wobei die rote Fluoreszenz hinsichtlich Ausdehnung und Intensität stetig zunahm. Zumindest am letzten Tag der Monitoringphase zeigte sich eine moderate Korrelation zwischen Fluoreszenz und gingivaler Entzündung (Bleeding-On-Marginal-Probing-Index). Sieben Tage nach Wiederaufnahme der habituellen Mundhygiene waren die Fluoreszenzwerte wieder auf das Niveau zu Beginn der Studie gesunken. Bei insgesamt drei Fluoreszenzmessungen nach 24h-Plaueakkumulation unter habitueller Mundhygiene (Tage -14, 0 und 21) konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Insgesamt zeigte sich eine moderate Korrelation zum Plaueindex nach Silness und Loe [van der Veen et al., 2016].

Bei einer Studie von Volgenant et al. wurden bei 48 Probanden Vestibulärflächen von Front- und Eckzähnen nach zwölfstündigem Verzicht auf Mundhygiene untersucht. Dabei wurde jeweils zunächst mittels QLF-D ein Fluoreszenzfoto angefertigt und anhand dessen der T-QHI-Plaueindex bestimmt. Darauf folgte das Anfärben der Zähne mit einem zweifarbigen Plaue-revelator und die klinische Bestimmung des T-QHI-Plaueindex und des Bleeding-On-Marginal-Probing-Index. Weiterhin wurden im angefärbten Zustand konventionelle Fotos angefertigt, anhand derer der T-QHI-Plaueindex einmal unter Berücksichtigung blau/rosa gefärbter Plaue und einmal unter isolierter Berücksichtigung blau gefärbter Plaue, bei welcher ein erhöhter Reifegrad angenommen wird, bestimmt. Es zeigte sich eine moderate bis starke Korrelation zwischen fluoreszierender und kombiniert blau/rosa angefärbter Plaue, wobei fluoreszierende Plaue konstant niedrigere Messwerte zeigte. Fluoreszierende und blau gefärbte Plaue hingegen zeigten insgesamt ähnliche Werte; es bestand jedoch nur eine schwache bis moderate Korrelation. An Stellen mit gingivaler Blutung zeigte sich

mehr fluoreszierende bzw. blau/rosa gefärbte Plaque; ein Zusammenhang zwischen gingivaler Blutung und reifer, blau gefärbter Plaque konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Insgesamt wurden daher keine absoluten Erkenntnisse über die Eignung der Fluoreszenzmessung zur Erkennung reifer Plaque gewonnen [Volgenant et al., 2016b].

3 Proband(inn)en, Materialien und Methoden

3.1 Studienziele und Abgrenzung

Die Ausführungen unter 3.1 befindet sich in identischer Ausführung in den Dissertationen von Frau Tabea Glanz und Herrn Alexander Georg Glanz und wurde von diesen gemeinsam verfasst.

3.1.1 Struktur und Verantwortlichkeiten

Die Studie wurde in den Räumlichkeiten der Poliklinik für Kieferorthopädie des Medizinischen Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen durchgeführt.

An der Studie waren zwei Studienleiterinnen (Frau Prof. Dr. Carolina Ganß, Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde und Frau Prof. Dr. Sabine Ruf, Poliklinik für Kieferorthopädie; Medizinisches Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen) und zwei Doktorand(inn)en (Frau Tabea Glanz, im Folgenden TG und Herr Alexander Georg Glanz, im Folgenden AG) beteiligt. Die Studienleiterinnen waren für die Planung der Studie, die Überwachung deren ordnungsgemäßer Durchführung, die statistische Auswertung und die Archivierung der Daten verantwortlich. Die Doktorand(inn)en waren ebenfalls für die Planung sowie ferner für die Rekrutierung, die Aufklärung und den Einschluss der Proband(inn)en, die ordnungsgemäße Dokumentation, die Durchführung der Untersuchungen und die planimetrische Auswertung der erhobenen Daten verantwortlich.

3.1.2 Fragestellung

Ziel der Studie war die Evaluierung der Möglichkeiten klinischer Plaquemessung mittels Fluoreszenzmessung mit dem QLF-D Biluminator (Inspektor Research, Amsterdam, Niederlande). Dabei sollten im Gesamtprojekt folgende Fragen beantwortet werden:

- (1) Korreliert die auf dem Fluoreszenzfoto quantifizierte Plaquemenge mit der auf dem konventionellen Foto nach Anfärben quantifizierten Plaquemenge, wenn die Aufnahmen **standardisiert mit Stativ und Kinn-/Stirnstütze** angefertigt werden?

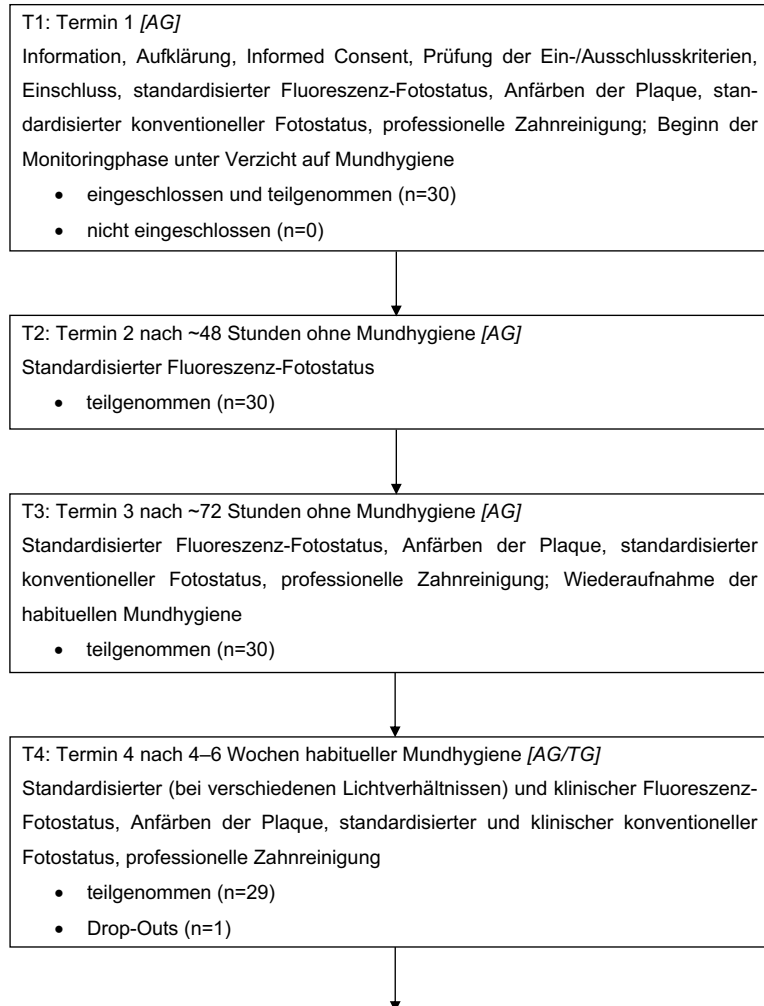
-
- (2) Ist das **Monitoring** von Plaquewachstum möglich, wenn die Aufnahmen **standardisiert mit Stativ und Kinn-/Stirnstütze** angefertigt werden?
- (3) Korreliert die auf dem Fluoreszenzfoto quantifizierte Plaquemenge mit der auf dem konventionellen Foto nach Anfärben quantifizierten Plaquemenge, wenn die Aufnahmen **in einem klinischen Setting** ohne Stativ und Kinn-/Stirnstütze angefertigt werden?
- (4) Korreliert die auf dem Fluoreszenzfoto quantifizierte Plaquemenge mit der auf dem konventionellen Foto nach Anfärben quantifizierten Plaquemenge, wenn die Aufnahmen standardisiert mit Stativ und Kinn-/Stirnstütze bzw. in einem klinischen Setting ohne Stativ und Kinn-/Stirnstütze **bei Proband(inn)en mit Multi-Bracket-Apparaturen** angefertigt werden?

Die Dissertation von Herrn Alexander Georg Glanz behandelt die erste und die zweite Fragestellung unter Schwerpunktsetzung auf Methodenentwicklung und Basisevaluation des Verfahrens. Die dritte und die vierte Fragestellung finden in der Dissertation von Frau Tabea Glanz Betrachtung. Die beim vierten Termin der Gruppe ohne Multi-Bracket-Apparatur im standardisierten Setting bei abgedunkelten Lichtverhältnissen erstellten Fluoreszenzfotos und die beim gleichen Termin im standardisierten Setting erstellten konventionellen Fotos wurden dabei von beiden Doktorand(inn)en genutzt.

3.1.3 Flussdiagramm

Das Flussdiagramm gibt Aufschluss über den Ablauf des Gesamtprojekts und die Verantwortlichkeiten zu den jeweiligen Terminen. Der/die verantwortliche Doktorand/-in ist durch Kürzel dargestellt, die/der jeweils andere übte am jeweiligen Termin assistierenden Tätigkeiten aus. Der Ablauf der Termine erfolgte in der dargelegten Reihenfolge.

Proband(inn)en ohne Multi-Bracket-Apparatur



**Auswertung [AG/TG]**

Rohdatenimport, Export, ROI-Markierung, spezifische Graustufenkonvertierung, Export in Graustufen, Auswertung nach Grenzwert, Umwandlung der Ergebnisse in Tabellenform

- erhobene Daten von T1, T2, T3, T4

Proband(inn)en mit Multi-Bracket-Apparatur**Termin 1 [TG]**

Information, Aufklärung, Informed Consent, Prüfung der Ein-/Ausschlusskriterien, Einschluss, standardisierter (bei verschiedenen Lichtverhältnissen) und klinischer Fluoreszenz-Fotostatus, Anfärben der Plaque, standardisierter und klinischer konventioneller Fotostatus, professionelle Zahnreinigung

- eingeschlossen und teilgenommen (n=20)
- nicht eingeschlossen (n=0)

**Auswertung [TG]**

Rohdatenimport, Export, ROI-Markierung, spezifische Graustufenkonvertierung, Export in Graustufen, Auswertung nach Grenzwert, Umwandlung der Ergebnisse in Tabellenform

- erhobene Daten von T1

3.2 *Untersuchte Proband(inn)engruppe*

Die Proband(inn)en wurden durch entsprechende Aushänge an der Justus-Liebig-Universität Gießen und durch Mundpropaganda rekrutiert. Interessierte Personen meldeten sich telefonisch oder per E-Mail beim Untersucher. Sie wurden bereits bei dieser Gelegenheit über den Studienablauf informiert und es wurde ein Termin vereinbart. Insgesamt wurden 14 weibliche und 16 männliche Personen eingeschlossen. Die Proband(inn)en waren zum Zeitpunkt des Einschlusses zwischen 20 und 32 Jahre alt; das Durchschnittsalter betrug $25,8 \pm 2,9$ Jahre (Abbildung 3). Es handelte sich um Studierende und Erwerbstätige. Mit Ausnahme einer Probandin, welche den letzten Termin nicht einhielt, gab es keine Drop-Outs.

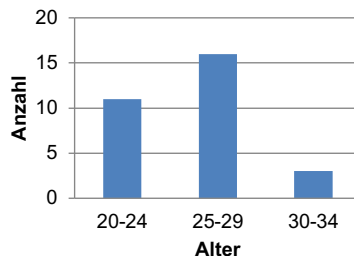


Abbildung 3: Altersverteilung

3.3 *Ein- und Ausschlusskriterien*

Die Einschlusskriterien waren Folgende:

- Bereitschaft zur Teilnahme
- Informed Consent
- Alter ≥ 16 Jahre
- vollständige Bezahlung im Untersuchungsgebiet

Die Ausschlusskriterien waren Folgende:

- schwere Allgemeinerkrankungen
- ausgeprägte Gingivitis mit Schwellung und Bluten
- Parodontitis
- Rezessionen von mehr als einem Drittel der Wurzellänge
- Behandlung mit Multi-Bracket-Apparatur

- Medikation, welche die Plaquebildung beeinflusst
- offensichtlich defekte Füllungen
- offene kariöse Läsionen
- ausgedehnte Füllungen an Glattflächen im Untersuchungsgebiet
- Vollkronen im Untersuchungsgebiet
- Zahnfehlbildungen im Untersuchungsgebiet

Kriterien für Drop-Outs:

- Abbruch seitens der Proband(inn)en

3.4 Studienablauf

3.4.1 Untersuchertraining

Es wurden der Umgang mit der Fotoeinrichtung, die Positionierung der Proband(inn)en, das Vorgehen beim Fotografieren sowie der Studienablauf insgesamt geübt. Hierzu stellten sich Personen aus dem Mitarbeiter/-innen- und Verwandtenkreis zur Verfügung.

Nach der Übungsphase folgten Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit. Dazu wurden durch zwei Untersucher/-innen Serien von Fotostaten nach zweimaligem Repositionieren eines Probanden (Fluoreszenzfotos und standardisierte konventionelle Fotos nach Anfärben) angefertigt und ausgewertet. Die Repositionierung des Probanden beinhaltete das Verlassen und erneute Betreten des Fotorumes. Der Messfehler bei der Auswertung wurde durch Mehrfachauswertungen von Fotos mit unterschiedlichen Plaquebedeckungsgraden untersucht.

3.4.2 Durchführung der Untersuchungen

Die Untersuchungen fanden zwischen dem 12.08.2013 und dem 31.11.2013 in der Poliklinik für Kieferorthopädie des Medizinischen Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Justus-Liebig-Universität Gießen unter Nutzung eines Fotorumes und eines mit einer zahnärztlichen Behandlungseinheit ausgestatteten Behandlungszimmers statt.

Interessierte wurden bereits im Telefongespräch über den Inhalt der Studie informiert. In der ersten Sitzung wurden der Informed Consent (Informationsbogen, Aufklärungsgespräch und Einverständniserklärung) eingeholt und die Ein-/Ausschlusskriterien

überprüft. In dieser Sitzung erfolgte auch der Einschluss der Proband(inn)en in die Studie. Darauf begaben sich die Proband(inn)en in den Fotoraum und es wurde ein standardisierter Fluoreszenz-Fotostatus erstellt. Nach Fertigstellung der Fluoreszenzmessung folgte in der zahnärztlichen Behandlungseinheit das Anfärben der Plaque mit einem Plaquerevelator. Nachfolgend wurden die Proband(inn)en wieder in den Fotoraum gebeten und es wurde ein standardisierter konventioneller Fotostatus erstellt. Abschließend erfolgte eine professionelle Zahnreinigung (vgl. 3.5.2).

Nach der Zahnreinigung begann das Monitoring des Plaquewachstums. Dazu verzichteten die Proband(inn)en für 72 Stunden auf sämtliche Mundhygienemaßnahmen. Innerhalb dieses Zeitraumes wurde nach 48 Stunden in einer zweiten Sitzung ein Fluoreszenz-Fotostatus unter standardisierten Bedingungen erstellt. Die dritte Sitzung nach 72 Stunden erfolgte analog zur ersten Sitzung; es wurden ein standardisierter Fluoreszenz-Fotostatus und darauf nach Anfärben ein standardisierter konventioneller Fotostatus erstellt sowie eine professionelle Zahnreinigung durchgeführt. Im Anschluss nahmen die Proband(inn)en ihre habituelle Mundhygiene wieder auf.

Der Ablauf der vierten Sitzung nach 4–6 Wochen entsprach hinsichtlich der in der vorliegenden Dissertation genutzten Daten (vgl. 3.1.2, 3.1.3) dem der ersten Sitzung. Zunächst erfolgte die Anfertigung eines standardisierten Fluoreszenz-Fotostatus im Fotoraum. Nach darauffolgendem Anfärben der Zähne in der Behandlungseinheit wurde im Fotoraum ein konventioneller Fotostatus erstellt. Abschließend wurde eine professionelle Zahnreinigung durchgeführt. Weitere bei diesem Termin erhobene Daten werden in einer anderen Dissertation betrachtet (vgl. 3.1.2, 3.1.3).

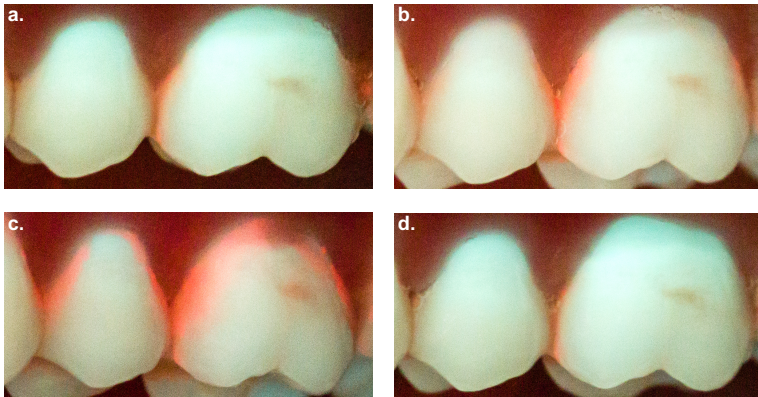


Abbildung 4: Fluoreszenzfotos der Zähne 25 und 26 von vestibulär zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten; a.: Termin 1 (habituelle Mundhygiene), b.: Termin 2 (Verzicht auf Mundhygiene seit 48 Stunden), c.: Termin 3 (Verzicht auf Mundhygiene seit 72 Stunden), d.: Termin 4 (habituelle Mundhygiene)

Abbildung 4 zeigt exemplarisch das mittels Fluoreszenzmessung dargestellte Plaquewachstum. Während sich die Bedeckungsgrade beim ersten und vierten Termin unter habitueller Mundhygiene ähneln, ist unter Verzicht auf Mundhygiene bereits beim zweiten Termin visuell eindeutig eine höhere Bedeckung erkennbar, welche zum dritten Termin weiter zunimmt.

3.5 Untersuchungsmethodik

3.5.1 Fotostatus

Standardisierte konventionelle und Fluoreszenzfotos wurden in einem fensterlosen Raum mit konstanten Lichtverhältnissen aufgenommen. Zur Untersuchung nahmen die Proband(inn)en auf einem Stuhl Platz; dabei wurde der Kopf auf einer Kinn-/Stirnstütze positioniert (Abbildung 5). Wangen und Lippen wurden mit Retraktoren beiseite gehalten und der Biss durch intermaxilläre Positionierung von Watterollen PluLine Gr. 1 (Pluradent AG & Co KG, Offenbach, Deutschland) außerhalb des Fokaltbereiches gesperrt. Die Positionierung der Kamera erfolgte mit Hilfe eines Statives. Dabei wurden ein Abstand von 5 cm vom Ende des Objektivtubus bis zum Mundraum und eine Ausrichtung im rechten Winkel zur Tangente des jeweiligen Abschnitts des Zahnbogens angestrebt. Je nach Untersuchungszeitpunkt wurden entweder konventionelle oder Fluoreszenzfotos angefertigt, wobei vor Anfertigung der Fluoreszenzfotos zunächst die

Umgebungsbeleuchtung ausgeschaltet wurde. Als erstes erfolgten direkte Aufnahmen der Vestibulärflächen der Frontzähne. Anschließend wurden die Oralflächen des Frontzahnbereiches von jeweils Ober- und Unterkiefer über intraorale Fotospiegel (Dent-o-care Dentalvertriebs GmbH, Höhenkirchen, Deutschland) fotografiert. Darauf erfolgten Aufnahmen von lateral, indem die Vestibulär- und Oralflächen der Seitenzähne ebenfalls über Fotospiegel erfasst wurden. Vor der Anfertigung der konventionellen Fotos wurde die Plaque mit einem Plaquerevelator in Lösungsform (Mira-2-Ton®, Hager und Werken GmbH & Co. KG, Duisburg) angefärbt. Dieser enthält Wasser, Natriumbenzoat und Kaliumsorbat sowie als eigentliche Farbstoffe Phloxin B (C.I. 45410) und Brillantblau (C.I. 42090). Dabei wird frische Plaque rosa und reife Plaque blau gefärbt [Hager & Werken GmbH & Co. KG, abgerufen am 19.01.2015]. Die Lösung wurde mit einem tropfend gesättigten Schaumstoffpellet PluLine Gr. 4 (Pluradent AG & Co KG, Offenbach, Deutschland) tupfend auf die Zahnoberflächen aufgebracht. Anschließend spülte der/die Proband/-in für 10 Sekunden mit Wasser. Die Anfertigung der konventionellen Fotos entsprach im Ablauf dem der Fluoreszenzfotos. Abbildungen 6 und 7 vergleichen exemplarisch einen mit QLF-D angefertigten Fluoreszenzfotozustatus mit dem korrespondierenden konventionellen Fotostatus nach Anfärben.



Abbildung 5: Versuchsaufbau im Fotoraum

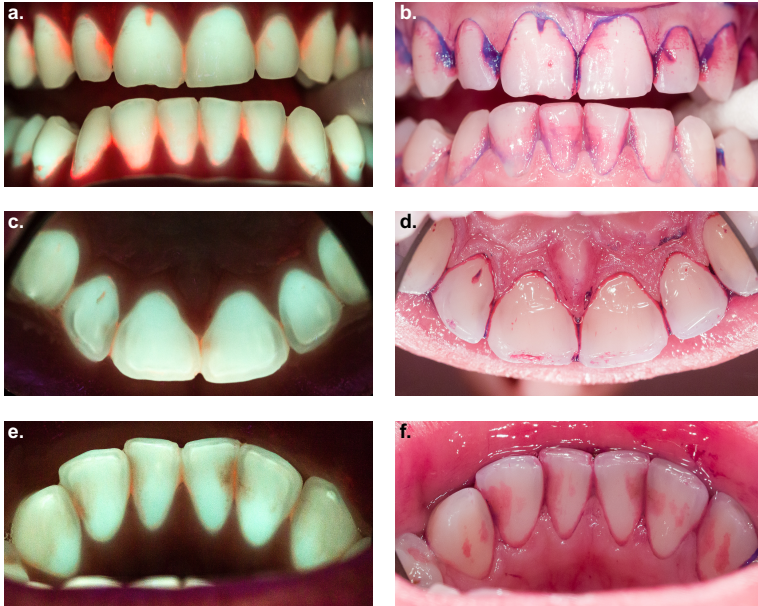


Abbildung 6: Aufnahmen der Frontzähne; **a.**, **c.** und **e.**: Fluoreszenzphotos (QLF-D), **b.**, **d.** und **f.**: konventionelle Fotos nach Anfärben mit Mira-2-Ton®, **a.** und **b.**: Ober-/Unterkiefer vestibulär, **c.** und **d.**: Oberkiefer oral, **e.** und **f.**: Unterkiefer oral

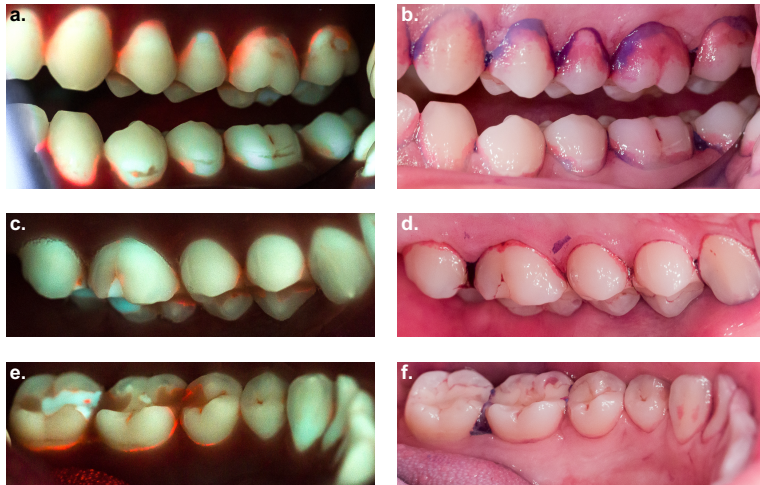


Abbildung 7: Aufnahmen der Seitenzähne; **a.**, **c.** und **e.**: Fluoreszenzphotos (QLF-D), **b.**, **d.** und **f.**: konventionelle Fotos nach Anfärben mit Mira-2-Ton®, **a.** und **b.**: Ober-/Unterkiefer vestibulär, **c.** und **d.**: Oberkiefer oral, **e.** und **f.**: Unterkiefer oral

3.5.2 Professionelle Zahnreinigung

Die professionelle Zahnreinigung beinhaltet das Entfernen von Zahnstein und fest anhaftenden Verfärbungen mittels Ultraschallscalern und Handinstrumenten sowie die Ablösung weicher Beläge auf Glattflächen mittels Gummikelchen und Zahnreinigungsbürstchen unter Verwendung von Zahnreinigungspaste (Cleanic®; Kerr GmbH, Rastatt, Deutschland). Die Reinigung der Approximalfächen erfolgte mit Zahnseide und Interdentalbürstchen.

3.6 Auswertung

3.6.1 Planimetrische Auswertung der Fotos

Entsprechend der Ein- und Ausschlusskriterien wurden bei allen Proband(inn)en die Oral- und Vestibulärflächen je eines Frontzahnes, eines Prämolaren und eines Molaren pro Kiefer untersucht. Dies entspricht 12 verschiedenen Flächen pro Proband/-in. Nach Möglichkeit wurden mittlere Schneidezähne, zweite Prämolaren und erste Molaren untersucht, wobei sich entweder für die rechte oder für die linke Kieferhälfte entschieden wurde. Dabei wurden je nach gewünschter Aufnahme folgende Kameraeinstellungen verwendet:

Methode: konventionelles Foto nach Anfärben

Belichtungszeit: 1/30 Sekunde

Blendenöffnung: f8.0

Empfindlichkeit: ISO 1600

Weißabgleich: manuell (Temperatur: 2000 K, Tönung: -8)

Lumineszenzdioden: weiß

Methode: Fluoreszenzfoto

Belichtungszeit: 1/30 Sekunde

Blendenöffnung: f5.6

Empfindlichkeit: ISO 1600

Weißabgleich: Tageslicht (Temperatur: 5200 K, Tönung: +3)

Lumineszenzdioden: blau-violett

Das Speichern der Fotos erfolgte im Rohdatenformat. Nach Übertragung der Fotos der jeweiligen Untersuchung auf einen Macintosh-Computer (Apple Inc., Cupertino, Kalifornien, USA) wurden diese zunächst nach Methode, Aufnahmeort, Aufnahmesituati-

on, Termin und Proband(inn)ennummer in Ordner einsortiert. Beispielsweise ergab sich für ein beim dritten Termin im Fotoraum aufgenommenes Fluoreszenzfoto der unteren Seitenzähne von oral bei Probandin Nr. 08 aus der Gruppe ohne Multi-Bracket-Apparatur folgende Ordnerstruktur: /non-MB/QLF/Raum/SZ_O_UK/T3/08. Diese Sortierung vereinfacht die zweifelsfreie Zuordnung der Fotos und ermöglicht dabei die automatisierte Auswertung einer bestimmten Aufnahmesituation unter Verarbeitung aller zugehörigen Bilddaten.

Anschließend wurden die sortierten Fotos in einen in Adobe Photoshop Lightroom 5.7.1 (Adobe Systems, San José, Kalifornien, USA) angelegten Katalog importiert. Die Auswertung der Fotos erfolgte aufgrund besserer Differenzierbarkeit plaquebedeckter Areale in Graustufen (vgl. 5.1). Da hinsichtlich ausgewogenen Histogramms, optimierter Schwarzweißmischung, Rauschverhalten und weiterer Eigenschaften einheitliche Bilder Voraussetzung für eine automatisierte Auswertung sind, wurden zur Schwarzweißkonvertierung diverse Entwicklungsvorgaben für die Rohdatenentwicklung erstellt und optimiert. Die einzelnen Entwicklungsvorgaben beinhalteten folgende Abweichungen vom Normwert:

Methode: konventionelles Foto nach Anfärben

Belichtung:

Frontzähne, Oralfflächen, Ober- und Unterkiefer: +2,6 Belichtungsstufen

Frontzähne, Vestibulärflächen, Ober- und Unterkiefer: +1,6 Belichtungsstufen

Seitenzähne, Oralfflächen, Ober- und Unterkiefer: +3 Belichtungsstufen

Seitenzähne, Vestibulärflächen, Ober- und Unterkiefer: +2,3 Belichtungsstufen

Gradationskurve: starker Kontrast

Schwarzweißmischung Rot, Lila, Magenta: -100

Rauschreduzierung Luminanz: 100; Farbe: 45

Methode: Fluoreszenzfoto

Belichtung:

Frontzähne, Oralfflächen, Ober- und Unterkiefer: +3 Belichtungsstufen

Frontzähne, Vestibulärflächen, Ober- und Unterkiefer: +2 Belichtungsstufen

Seitenzähne, Oralfflächen, Ober- und Unterkiefer: +3,5 Belichtungsstufen

Seitenzähne, Vestibulärflächen, Ober- und Unterkiefer: +3 Belichtungsstufen

Gradationskurve: mittlerer Kontrast

Schwarzweißmischung Rot, Orange: -100

Rauschreduzierung Luminanz: 100

Durch Nutzung dieser Entwicklungsvorgaben ließ sich ein größtmöglicher Kontrast zwischen plaquefreien und plaquebedeckten Arealen erzeugen.

Da die Flächenauswahl zur besseren Erkennung des Gingivalrandes am farbigen Foto vor Schwarzweißkonvertierung durchgeführt wurde, wurden die Fotos zunächst unter Beibehaltung der Standardeinstellungen in ein Verzeichnis ins JPEG-Format exportiert. Nach Graustufenkonvertierung durch Anwendung einer der Aufnahmesituation entsprechenden Entwicklungsvorgabe wurden die Fotos in ein weiteres Verzeichnis ins JPEG-Format exportiert, sodass für jedes Foto zwei Versionen vorlagen. Dabei wurde in beiden Fällen die Sortierung mit Hilfe eines Zusatzmoduls erhalten (LR/TreeExporter; Timothy Armes, Bésayes, Frankreich).

Die Weiterverarbeitung erfolgte durch Stapelverarbeitung mit der Software ImageJ 1.47q. Dabei handelt es sich um eine Java™-Applikation zur wissenschaftlichen Bildverarbeitung, welche es erlaubt Arbeitsabläufe mit Hilfe von Makros zu automatisieren. Zur quantitativen Auswertung der Fotos wurde ein entsprechendes Makro programmiert. Bei dessen Ausführung wird zunächst ausgewählt, ob die Auswahl der auszuwertenden Flächen oder die Auswertung bereits zuvor ausgewählter Flächen stattfinden soll (Abbildung 8). Im nächsten Schritt erfolgt die Wahl des Verzeichnisses, in welchem sich die Daten befinden. Dabei werden alle Bilddateien, die sich im Verzeichnis und dessen Unterverzeichnissen befinden, erfasst.

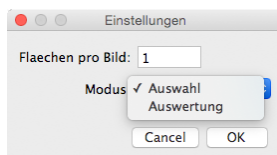


Abbildung 8: Auswahl der gewünschten Makrofunktion; ImageJ 1.47q

Im Modus „Auswahl“ werden nacheinander alle erfassten Bilddateien angezeigt. Der Benutzer wird für jedes Foto aufgefordert, die Auswahl der entsprechenden Zahnfläche mittels eines Polygon-Werkzeuges vorzunehmen (Abbildung 9). Jede sog. Region of Interest (ROI) wird dabei als einzelne Datei im Format *Bildname_Fläche.roi* im Verzeichnis des Bildes gespeichert. Nach erfolgter Auswahl der auszuwertenden Flächen wird das Foto geschlossen und das nächste Foto gezeigt. Die Auswahl erfolgte an den in Originealeinstellungen exportierten Fotos.

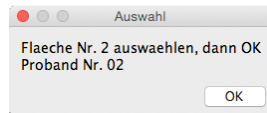


Abbildung 9: Information zur auszuwählenden Fläche; ImageJ 1.47q

Anschließend wurden die Flächen mittels Stapelverarbeitung unter Verwendung der zuvor erstellen ROI-Dateien ausgewertet. Dazu wurden die erstellten ROI-Dateien in die entsprechenden Verzeichnisse der in Graustufen exportierten Fotos kopiert und das Auswertungsmakro (vgl. Abbildung 8) ausgeführt. Dort werden zunächst Grenzwerte für die Flächenerkennung abgefragt. Diese beziehen sich auf 8 Bit-Graustufen und geben an, bis zu welcher Helligkeit ein Pixel als plaquebedeckte Oberfläche gewertet wird. Dabei entspricht der Wert 0 einem reinen Schwarz und der Wert 255 einem reinen Weiß. Die entsprechende Spanne erstreckt sich immer vom reinen Schwarz bis zum gewählten Wert. Wenn gewünscht, können Flächen automatisiert mehrfach unter Verwendung verschiedener Graustufenschwellenwerte ausgewertet werden, indem zwei unterschiedliche Grenzwerte und die entsprechenden Schritte angegeben werden (Abbildung 10).

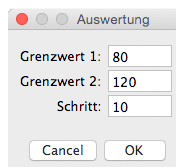


Abbildung 10: Grenzwertfestlegung; ImageJ 1.47q

Beispielauswertungen unter Anwendung verschiedener Grenzwerte wurden in Konsensustreffen der Arbeitsgruppe hinsichtlich der Ergebnisse der Flächenerkennung visuell auf Plausibilität beurteilt. Dabei wurde für die Methode „konventionelles Foto nach Anfärben“ der Grenzwert 90 und für die Methode „Fluoreszenzfoto (QLF-D)“ der Grenzwert 180 als Graustufenschwellenwert definiert.

Die Anzahl der einem Foto zugehörigen ROI-Dateien und somit der markierten Flächen wird automatisiert erkannt, sodass das Makro auch bei Fotos mit unterschiedlicher Flächenanzahl verwendet werden kann. Vor der Erfassung der Pixelanzahl wird zwecks Kontrastverbesserung innerhalb der Region of Interest eine Histogrammäqualisation durchgeführt. Dies führt zu einer Gleichverteilung der

Grauwerte im gewählten Bildausschnitt [Jain, 1989]. Anschließend wird die Gesamtanzahl der Pixel der Region of Interest sowie die Anzahl der Pixel innerhalb der Region of Interest, deren Grauwert geringer oder gleich des gewählten Schwellenwertes ist, in Form einer Tabelle zusammen mit den Pfad des analysierten Fotos sowie der Flächennummer ausgegeben und das Zielkriterium, die prozentuale Bedeckung mit Plaque, durch Division der Anzahl Pixel im gewählten Graustufenbereich innerhalb der Region of Interest durch die Gesamtanzahl Pixel innerhalb der Region of Interest berechnet. Weiterhin wird die Visualisierung der jeweiligen Analyse im Ordner des ausgewerteten Fotos im JPEG-Format abgelegt. Abbildungen 11 und 12 zeigen beispielhaft den Prozess der Auswertung anhand eines konventionellen Fotos nach Anfärben und des korrespondierenden Fluoreszenzfotos.

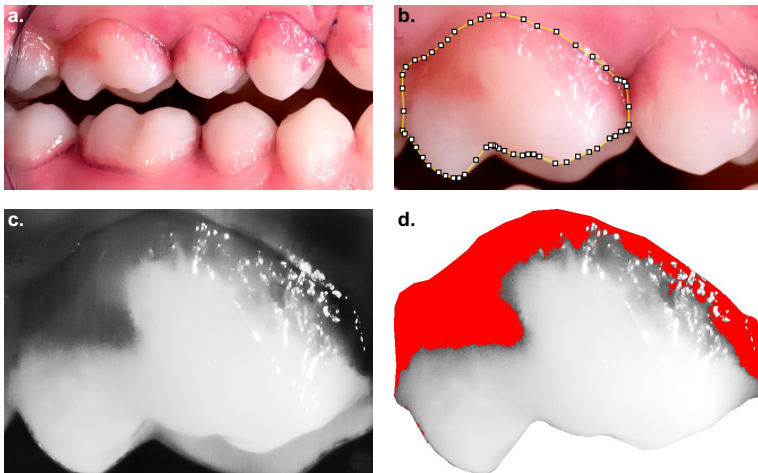


Abbildung 11: Flächenanalyse bei Zahn 16 (konventionelles Foto nach Anfärben); **a.:** Ausgangsfoto der Ober-/Unterkieferseitenzähne vestibulär, **b.:** Auswahl der Vestibulärfläche von Zahn 16; ImageJ 1.47q, **c.:** Ansicht des Zahnes nach Graustufenkonvertierung, **d.:** identifiziertes Areal nach Anwendung der Auswahlmaske

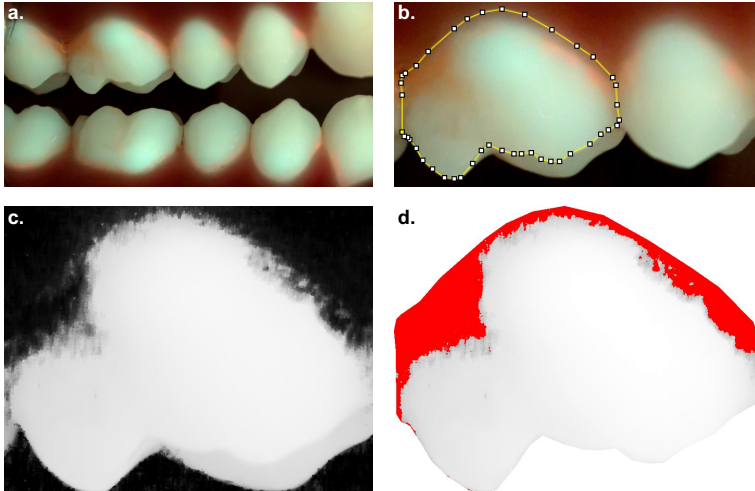


Abbildung 12: Flächenanalyse bei Zahn 16 (Fluoreszenzfoto); a.: Ausgangsfoto der Ober-/Unterkieferseitenzähne vestibulär, b.: Auswahl der Vestibulärfläche von Zahn 16; ImageJ 1.47q, c.: Ansicht des Zahnes nach Graustufenkonvertierung, d.: identifiziertes Areal nach Anwendung der Auswahlmaske

Die Weiterverarbeitung der in Tabellenform gespeicherten Ergebnisse erfolgte in Excel für Mac 2011 (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) unter Entwicklung eines Visual Basic™-Scripts zur automatisierten Sortierung und Strukturierung der Werte. Hierzu ist als einziger manueller Schritt bei Verwendung mehrerer Grenzwerte die Eingabe der Grenzwertanzahl pro Fläche notwendig (Abbildung 13, vgl. Abbildung 10: in diesem Beispiel handelt es sich um 5 Werte pro Fläche). Die statistische Auswertung der Daten erfolgte anhand der so generierten Tabelle.



Abbildung 13: Makro zur automatisierten Datenmodulation; Excel für Mac 2011

3.6.2 Pseudonymisierung

Zu Beginn der Studie wurde eine Liste mit zweistelligen Proband(inn)ennummern von 01 bis 30 erstellt. Die Verteilung der Proband(inn)ennummern erfolgte durch den Doktoranden. Zusammen mit der Proband(inn)ennummer wurden Name und Telefonnummer in einer verschlüsselten Tabelle dokumentiert, die nach der Auswertung gelöscht wurde. Alle Fotografien und Auswertungen sind nur mit der Proband(inn)ennummer versehen. Die Einverständniserklärungen werden gesondert in der Poliklinik für Zahnerhaltungskunde und Präventive Zahnheilkunde von der Studienleitung aufbewahrt. Die Daten wurden pseudonymisiert ausgewertet.

3.6.3 Fallzahl

Da es sich nicht um eine Interventionsstudie handelte, konnte die Fallzahlschätzung nicht von klinisch relevanten Effektgrößen unterschiedlicher Interventionen abgeleitet werden. Daher wurde im Wesentlichen auf Gruppengrößen in der Literatur zur Evaluation planimetrischer Verfahren Bezug genommen.

Studien zur Evaluation von Verfahren zum Monitoring von Plaquewachstum haben 2 [Quirynen et al., 1985], 11 [Soder et al., 1993] oder 14 [Quirynen et al., 1991] Proband(inn)en eingeschlossen.

Studien zur Evaluierung von Methoden zur Plaquemessung haben 6 [Sagel et al., 2000] oder 25 [Carter et al., 2004] Proband(inn)en eingeschlossen.

Studien mit Interventionen zur Plaqueentfernung mit Cross-Over-Design haben 10 [Sagel et al., 2000], 25 [Staudt et al., 2001] oder 30 [Claydon und Addy, 1995] Proband(inn)en, Studien mit Parallel-Design 11 bzw. 12 Proband(inn)en pro Gruppe [Zee et al., 1997] oder 29 Proband(inn)en pro Gruppe [Mohan et al., 2012] untersucht.

Insgesamt schien für die Proband(inn)engruppe ohne Multi-Bracket-Apparatur eine Anzahl von 25 Proband(inn)en ausreichend. Da mehrere Termine wahrzunehmen waren, wurden zum Ausgleich von Drop-Outs 30 Proband(inn)en eingeschlossen.

3.6.4 Zielkriterien und statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte in IBM SPSS Statistics 21 (IBM Corp., Armonk, New York, USA). Zielkriterium war die prozentuale Bedeckung der Vestibulär-/Oralfläche des jeweiligen Zahnes mit Plaque nach Darstellung mittels Fluoreszenzfo-

tografie (QLF-D) und durch konventionelle Fotografie nach Anfärben der Plaque mit einem Plaquerevektor.

Die Daten wurden auf hinreichende Gauß-Verteilung getestet (Kolmogorov-Smirnov-Test). Dabei zeigte sich eine signifikante Abweichung von der Normalverteilung. Auf Grund dessen wurden zum Vergleich beider Methoden parameterfreie Verfahren (Wilcoxon-Mann-Whitney-Test, Rangkorrelationskoeffizient r_s nach Spearman, Binomialtest) verwendet.

Zur Prüfung der Übereinstimmung beider Methoden wurden die planimetrischen Daten von Fluoreszenz- und konventionellen Fotos mit Bland-Altman-Plots [Bland und Altman, 1986] analysiert. Dabei wurde auf der x-Achse der Mittelwert der Messwerte beider Methoden und auf der y-Achse die Differenz der Messwerte beider Methoden aufgezeichnet. Ein relativer Bias liegt vor, wenn der Mittelwert der Differenzen der Methoden signifikant von Null abweicht (T-Test bei einer Stichprobe) [Ludbrook, 2002].

Sofern nicht anders angegeben, sind die Werte in Tabellen und in den Abbildungen 14 und 15 als \bar{x} (min, max) in Prozent angeführt. In Abbildungen ist allgemein $p \leq 0,05$ mit *, $p \leq 0,01$ mit ** und $p \leq 0,001$ mit *** gekennzeichnet. In den Tabellen 7 und 10 wurde auf Grund der Vielzahl an Tests eine Bonferroni-Korrektur durchgeführt und eine Signifikanzgrenze von 0,001 festgelegt. Die Analyse beschränkt sich hier auf die Vergleiche zwischen T1 und T3 (gekennzeichnet mit ●) und zwischen T3 und T4 (gekennzeichnet mit ♦). Fett gedruckte Werte in Tabelle 11 zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen konventioneller Plaquemessung nach Anfärben und Fluoreszenzmessung an.

3.7 Risiken

Es wurde gezeigt, dass der Verzicht auf Mundhygienemaßnahmen für 72 Stunden keine negativen Auswirkungen auf die Mundgesundheit hat. Die Menge innerhalb von vier Tagen gebildeter Plaque ist stark von individuellen Ernährungsgewohnheiten abhängig. So wurden nach viertätiger kohlenhydratfreier Diät bei Proband(inn)en, welche zusätzlich saccharosehaltige Bonbons konsumierten, deutlich höhere Plaquewerte als bei Proband(inn)en, welche keine Zuckersubstitution erhielten, gemessen [Rateitschak-Pluss und Guggenheim, 1982]. Die typische Bakterienflora einer Gingivitis entsteht erst nach 4-7 Tagen und frühestens in diesem Zeitraum sind erste Anzeichen einer nach Plaqueentfernung reversiblen Gingivitis zu erwarten. Mit einer klinisch manifesten Gingivitis ist nach 10-21 Tagen zu rechnen [Loe et al., 1965]. Da am Ende der Monitoringphase im Rahmen der professionellen Zahnreinigung alle harten und weichen Beläge entfernt wurden, sind keine Nachteile für die Proband(inn)en zu erwarten.

3.8 Ethikvotum und Datenschutz

Die Planung und die Durchführung der Studie richteten sich nach den Prinzipien der „Good Clinical Practice“ und den Grundsätzen der Deklaration von Helsinki. Das Studienprotokoll wurde der Ethik-Kommission des Fachbereichs Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen vorgelegt; das positive Votum liegt unter AZ 58/13 vor.

Die Proband(inn)en wurden mündlich und schriftlich über Inhalt und Ziel der Studie informiert. Die Daten unterliegen dem hessischen Datenschutzgesetz. Alle Daten, die erhoben worden sind, wurden durch Verwendung von persönlichen Proband(inn)ennummern pseudonymisiert protokolliert und archiviert. Eine Zuordnung zwischen erhobenen Daten und Personen ist nur über die Einverständniserklärung möglich. Nicht pseudonymisierte personenbezogene Daten wurden nicht erhoben. Die Daten werden von der Studienleitung für die Mindestdauer von 10 Jahren archiviert.

4 Ergebnisse

4.1 Validierung der Methode

4.1.1 Reproduzierbarkeit

Zur Prüfung der Reproduzierbarkeit wurden durch zwei Untersucher/-innen innerhalb eines Tages jeweils zwei standardisierte Fluoreszenz- sowie nach Anfärben konventionelle Fotostaten eines Probanden angefertigt. Der Proband verließ nach jedem Fotostatus den Fotoraum und wurde anschließend neu positioniert. Die Auswertung je eines Frontzahnes und eines Molaren erschien hier ausreichend. Dies stellt den Gesamtfehler bei Anfertigung (Fotovariabel) und anschließender Messung (Auswertungsvariabel) dar.

Zur Bestimmung der Abweichung wurde für jede Aufnahmesituation der Median der vier Messergebnisse gebildet (Tabelle 2) und die mediane absolute Abweichung von diesem berechnet. Im Median aller Aufnahmesituationen betrug diese sowohl bei Fluoreszenz- als auch bei konventionellen Fotos nach Anfärben 1,4 Prozentpunkte.

Tabelle 2: Plaquebedeckung (%) bei Fluoreszenz- und konventionellen Fotos nach zweifacher Auswertung durch zwei Untersucher/-innen; die Werte entsprechen bei U1/U2 je den Untersuchern 1 und 2 sowie bei M1/M2 der ersten und zweiten Messung

Konventionelle Fotos nach Anfärben							
Kiefer	Zahn	Fläche	U1		U2		\bar{x} (min, max)
			M1	M2	M1	M2	
Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	12,8	10,4	8,7	13,0	11,6 (8,7; 13,0)
		oral	66,2	71,3	64,0	66,2	66,2 (64; 71,3)
	Molar	vestibulär	26,4	35,8	33,6	24,1	30,0 (24,1; 35,8)
		oral	19,6	14,0	21,3	19,0	19,3 (14; 21,3)
Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	78,5	73,8	72,8	83,4	76,2 (72,8; 83,4)
		oral	67,0	69,2	66,3	72,7	68,1 (66,3; 72,7)
	Molar	vestibulär	35,3	39,7	37,5	43,0	38,6 (35,3; 43,0)
		oral	31,6	30,7	32,6	36,0	32,1 (30,7; 36,0)
Fluoreszenzfotos							
Kiefer	Zahn	Fläche	U1		U2		\bar{x} (min, max)
			M1	M2	M1	M2	
Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,1	2,5	2,0	1,6	2,0 (1,6; 2,5)
		oral	57,0	57,6	67,6	60,9	59,2 (57; 67,6)
	Molar	vestibulär	11,4	14,4	15,7	12,9	13,6 (11,4; 15,7)
		oral	6,4	13,3	10,5	11,2	10,9 (6,4; 13,3)

Kiefer	Zahn	Fläche	U1		U2		\bar{x} (min, max)
			M1	M2	M1	M2	
Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	29,1	30,0	27,7	29,8	29,4 (27,7; 30,0)
		oral	62,4	63,8	60,7	67,6	63,1 (60,7; 67,6)
	Molar	vestibulär	9,9	10,8	10,4	10,5	10,4 (9,9; 10,8)
		oral	17,3	28,4	22,0	29,1	25,2 (17,3; 29,1)

4.1.2 Mehrfachauswertungen

Zur Validierung wurden jeweils eine Serie Fluoreszenz- und konventionelle Fotos nach Anfärben (Vestibulär- und Orallflächen von Oberkiefer-/Unterkieferfrontzähnen und Molaren) bei eher niedriger und eine Serie bei eher hoher Plaquebedeckung je 10-fach markiert und ausgewertet (Tabelle 3). Dies stellt den Messfehler bei der Flächenauswahl (Auswertungsvariable) dar.

Zur Bestimmung der Abweichung wurde für jede Aufnahmesituation der Median der zehn Messergebnisse gebildet und die mediane absolute Abweichung von diesem berechnet. Diese betrug im Median aller Aufnahmesituationen bei eher niedriger Plaquebedeckung für Fluoreszenzfotos 0,35 Prozentpunkte und für konventionelle Fotos nach Anfärben 0,12 Prozentpunkte sowie bei eher hoher Plaquebedeckung für Fluoreszenzfotos 0,22 Prozentpunkte und für konventionelle Fotos nach Anfärben 0,10 Prozentpunkte.

Tabelle 3: Plaquebedeckung nach Mehrfachauswertung von je zwei Serien Fluoreszenz- und konventioneller Fotos; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Kiefer	Zahn	Fläche	QLF-D	konventionell
Eher niedrige Plaquebedeckung				
Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	6,7 (6,1; 7,1)	5,6 (5,4; 6,1)
		oral	11,6 (11,0; 12,4)	5,5 (5,4; 5,6)
	Molar	vestibulär	33,5 (30,6; 37,6)	5,9 (5,7; 6,1)
		oral	7,6 (7,4; 7,8)	5,8 (5,5; 5,9)
Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	16,8 (16,3; 17,9)	3,9 (3,8; 3,9)
		oral	20,9 (18,8; 24,8)	9,6 (9,3; 9,9)
	Molar	vestibulär	29,7 (28,6; 30,5)	16,0 (15,2; 16,5)
		oral	9,8 (9,3; 11,2)	8,6 (8,2; 9,4)
Eher hohe Plaquebedeckung				
Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	8,9 (8,4; 9,9)	10,8 (10,7; 11,0)
		oral	48,6 (47,4; 49,2)	30,3 (30,0; 30,4)
	Molar	vestibulär	60,2 (60,0; 60,6)	71,8 (71,5; 72,1)
		oral	31,3 (30,8; 31,5)	17,8 (17,3; 18,5)

Kiefer	Zahn	Fläche	QLF-D	konventionell
Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	31,6 (31,0; 31,9)	14,3 (14,0; 14,7)
		oral	48,4 (47,2; 48,6)	45,2 (44,6; 45,3)
	Molar	vestibulär	31,7 (29,8; 33,8)	5,8 (5,6; 5,9)
		oral	21,6 (20,5; 22,4)	21,4 (20,4; 23,2)

Des Weiteren ergab die zweifach wiederholte Auswertung der zu T4 im Fotoraum erhobenen Daten der Front- und Seitenzähne (Fluoreszenz- sowie konventionelle Fotos nach Anfärben) bei 10 zufällig ausgewählten Proband(inn)en unter Berücksichtigung der ursprünglichen Ergebnisse einen Median der medianen absoluten Abweichung vom Median der erkannten Plaquebedeckung von 0,11 Prozentpunkten bei Messung mittels Fluoreszenzfoto sowie von 0,15 Prozentpunkten bei konventioneller Messung nach Anfärben.

4.1.3 Leerwertbestimmung

Um zu prüfen, ob gereinigte Zahnoberflächen auf Fluoreszenzfotos eindeutig als plaquefrei identifiziert werden können, wurden bei zwei Probanden direkt nach Erzeugung bestmöglicher Plaquefreiheit (professionelle Zahnreinigung) standardisierte Fluoreszenzfotos angefertigt. Nach Auswertung der Vestibulärflächen jeweils eines Ober- und Unterkieferfrontzahnes zeigten sich sehr geringe Messwerte, welche zwischen vollständiger Plaquefreiheit bei Proband 1 im Unterkiefer bis hin zu einer Bedeckung von 0,53% bei Proband 2 im Unterkiefer lagen. Die gemessene Bedeckung lag im Median bei 0,07%; die mediane absolute Abweichung vom Median der Messergebnisse betrug 0,06% (Tabelle 4).

Tabelle 4: Plaquebedeckung bei Fluoreszenzmessung nach professioneller Zahnreinigung; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Proband	Kiefer	Bedeckung
1	Oberkiefer	0,02 (0,02; 0,02)
	Unterkiefer	0,0 (0,0; 0,0)
2	Oberkiefer	0,11 (0,11; 0,11)
	Unterkiefer	0,53 (0,53; 0,53)

4.2 Konventionelle Messung nach Anfärben

4.2.1 Gesamtbetrachtung

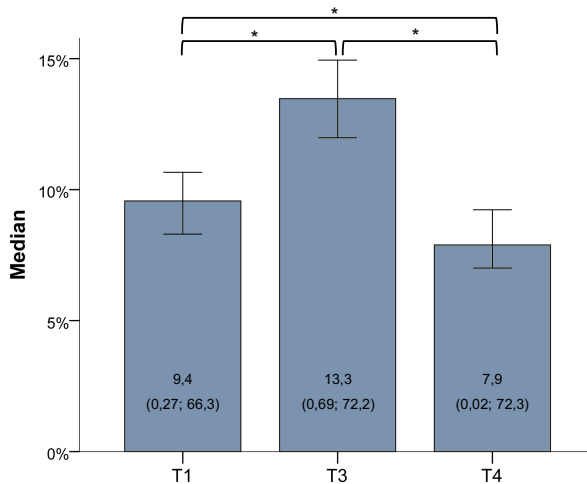


Abbildung 14: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 bei konventioneller Messung nach Anfärben; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent, Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervall

Es zeigte sich, dass der Verzicht auf sämtliche Mundhygienemaßnahmen für 72 Stunden (T3) mit 13,3% zu signifikant höherer medianer Plaquebedeckung im Vergleich zum Zustand bei habitueller Mundhygiene (T1 mit 9,4% und T4 mit 7,9%) führte (Abbildung 14). Weiterhin zeigte sich zu T4 eine signifikant geringere mediane Plaquebedeckung als zu T1 und T3. Die Korrelation zwischen T1 und T4 betrug $r_s = 0,57$ ($p \leq 0,001$).

4.2.2 Auswertung nach Fläche

Die beschriebenen Effekte waren bei Vestibulärflächen deutlicher als bei Orallflächen. Bei Beurteilung der Orallflächen war zwischen der medianen Bedeckung bei T1 mit 10,3% und T3 mit 10,5% kein signifikanter Unterschied feststellbar. Zu T4 sank die mediane Plaquebedeckung auf 8,1% ab und war damit signifikant geringer als zu T1 ($p \leq 0,01$) und T3 ($p \leq 0,001$).

Bei Vestibulärflächen war eine signifikante Zunahme der medianen Bedeckung von 8,6% bei T1 auf 19,7% bei T3 ($p \leq 0,001$) sowie eine Abnahme auf 7,4% bei T4, wo die

mediane Bedeckung signifikant unter T1 ($p \leq 0,05$) und T3 ($p \leq 0,01$) lag, erkennbar (Tabelle 5).

Tabelle 5: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 nach Fläche bei konventioneller Messung nach Anfärben; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Fläche	T1	T3	T4
oral	10,3 (0,28; 61,5)	10,5 (1,0; 58,5)	8,1 (0,02; 72,33)
vestibulär	8,6 (0,27; 66,3)	19,7 (0,7; 72,2)	7,4 (0,18; 67,23)

4.2.3 Auswertung nach Fläche und Kiefer

Bei einzelner Betrachtung von Ober- und Unterkieferflächen stellten sich die Ergebnisse ähnlich dar.

So waren bei Oralflächen des Oberkiefers zwischen T1 (8,6%), T3 (8,8%) und T4 (7,8%) keine signifikanten Veränderungen der medianen Bedeckung festzustellen. Oralflächen des Unterkiefers zeigten zu T3 mit 13,1% eine geringere mediane Bedeckung als zu T1 (14,0%); zu T4 lag die mediane Bedeckung bei 8,8% und war damit deutlich geringer als zu T1 und T3. Hinsichtlich Vestibulärflächen war die mediane Plaquebedeckung zu T3 mit 31,8% im Ober- bzw. 14,9% im Unterkiefer signifikant höher als bei den anderen beiden Messungen, zwischen denen mit medianen Bedeckungswerten von im Oberkiefer jeweils 9,5% bei T1 und T4 sowie im Unterkiefer von 7,7% bei T1 und 7,2% bei T4 kaum Unterschiede bestanden (Tabelle 6).

Tabelle 6: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 nach Fläche und Kiefer bei konventioneller Messung nach Anfärben; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Fläche	Kiefer	T1	T3	T4
oral	Oberkiefer	8,6 (0,28; 40,9)	8,8 (1,0; 58,5)	7,8 (0,33; 46,3)
	Unterkiefer	14,0 (0,7; 61,5)	13,1 (1,18; 55,6)	8,8 (0,02; 72,3)
vestibulär	Oberkiefer	9,5 (0,29; 66,3)	31,8 (0,69; 72,2)	9,5 (0,69; 67,2)
	Unterkiefer	7,7 (0,27; 58,2)	14,9 (1,5; 45,4)	7,2 (0,18; 29,6)

4.2.4 Auswertung nach Fläche, Kiefer und Zahn

Bei Betrachtung der einzelnen Zahngruppen (Tabelle 7) zeigten sich bei Vestibulärflächen mit Ausnahme der Unterkieferprämolaren zwischen T1 (6,4%) und T3 (11,4%) für alle Messsituationen signifikante Unterschiede zwischen T1 und T3 sowie zwischen T3 und T4. Von T1 zu T3 zeigte sich im Unterkiefer ungefähr eine Verdopplung der medianen Plaquebedeckung. Diese stieg bei Frontzähnen von 4,6 bzw. bei Prämolaren von 6,4% auf jeweils 11,4% und bei Molaren von 10,5% auf 18,3%. Im Oberkiefer zeigte sich ungefähr eine Verdreifachung der medianen Bedeckung, welche bei Front-

zähnen von 2,3% auf 8,8%, bei Prämolaren von 11,1% auf 35,9% und bei Molaren von 19,2% auf 50,6% anstieg. Die medianen Bedeckungswerte zu T1 und T4 ähnelten sich. Abbildung 16 zeigt die grafische Darstellung der Ergebnisse.

Bezüglich der Oralflächen traten hingegen keine signifikanten Unterschiede auf. Hier lag die mediane Bedeckung im Oberkiefer zwischen 6,4% und 9,9%, während die mediane Bedeckung im Unterkiefer mit 8,5% bis 17% etwas höhere Werte zeigte.

Tabelle 7: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 nach Fläche, Kiefer und Zahn bei konventioneller Messung nach Anfärben; ● = signifikanter Unterschied zwischen T1 und T3, ♦ = signifikanter Unterschied zwischen T3 und T4; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Kiefer	Zahn	T1	T3	T4
Oralflächen				
Oberkiefer	Frontzahn	6,6 (0,28; 40,9)	7,4 (1,0; 58,5)	6,4 (0,33; 46,3)
	Prämolar	9,9 (2,7; 18,8)	9,9 (4,2; 18,2)	7,3 (3,2; 26,2)
	Molar	7,5 (0,91; 16,1)	8,8 (2,1; 18,3)	8,9 (0,91; 23,5)
Unterkiefer	Frontzahn	14,0 (0,76; 61,5)	13,4 (2,14; 55,6)	8,8 (0,02; 72,3)
	Prämolar	17,0 (0,88; 48,9)	14,0 (1,2; 44,3)	8,5 (0,83; 31,0)
	Molar	13,5 (0,92; 39,0)	12,4 (2,2; 37,7)	9,3 (0,11; 34,8)
Kiefer	Zahn	T1	T3	T4
Vestibulärflächen				
Oberkiefer	Frontzahn	2,3 (0,29; 11,6)	8,8 (0,69; 43,8) ●	3,3 (0,69; 16,9) ♦
	Prämolar	11,1 (2,1; 52,1)	35,9 (3,3; 69,2) ●	12,2 (2,3; 62,1) ♦
	Molar	19,2 (3,8; 66,3)	50,6 (8,6; 72,2) ●	21,2 (2,9; 67,2) ♦
Unterkiefer	Frontzahn	4,6 (0,27; 58,23)	11,4 (2,7; 45,4) ●	5,1 (0,18; 24,3) ♦
	Prämolar	6,4 (0,89; 31,2)	11,4 (1,5; 33,7)	6,4 (1,1; 23,3) ♦
	Molar	10,5 (2,7; 41,4)	18,3 (11,9; 41,9) ●	8,3 (2,7; 29,6) ♦

4.3 Fluoreszenzmessung

4.3.1 Gesamtbetrachtung

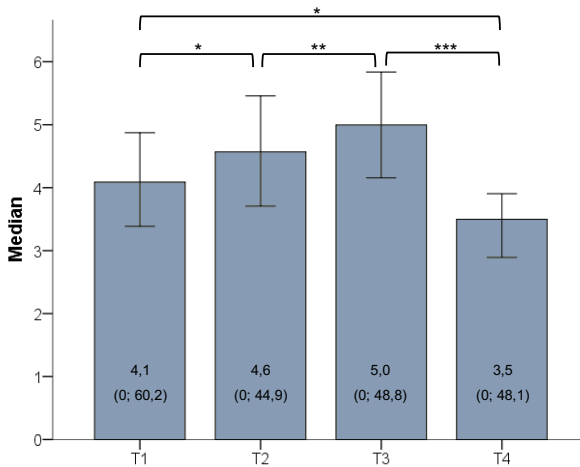


Abbildung 15: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 bei Fluoreszenzmessung; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent, Fehlerbalken: 95%-Konfidenzintervall

Analog zur konventionellen Messung nach Anfärben zeigten sich auch bei Fluoreszenzmessung mittels QLF-D unter Verzicht auf Mundhygienemaßnahmen mit 4,6% bei T2 und 5,0% bei T3 signifikant höhere mediane Bedeckungsgrade als bei Messungen unter habitueller Mundhygiene, welche bei T1 einen Wert von 4,1% und bei T4 einen Wert von 3,5% ergaben. Zu T4 war die medianer Plaquebedeckung signifikant geringer als zu den übrigen Terminen (Abbildung 15). Die Korrelation zwischen T1 und T4 lag bei $r_s = 0,88$ ($p \leq 0,01$).

4.3.2 Auswertung nach Fläche

Die beschriebenen Effekte waren bei Vestibulärflächen deutlicher als bei Orallflächen (Tabelle 8).

Hinsichtlich der Orallflächen waren mit 7,2% bei T1, 6,0% bei T2 und 6,9% bei T3 keine signifikanten medianen Bedeckungsunterschiede feststellbar. Die mediane Bedeckung bei T4 war mit 5,2% signifikant geringer als bei T1 und T3 (jeweils $p \leq 0,001$).

Bei Vestibulärflächen trat von T1 über T2 ($p \leq 0,01$) zu T3 ($p \leq 0,001$) mit 2,6%, 3,4% und 3,6% eine signifikante Zunahme der medianen Bedeckung auf. Weiterhin lag die mediane Bedeckung zu T4 bei 2,2% und war damit signifikant geringer als zu T1 und T3 (jeweils $p \leq 0,001$).

Tabelle 8: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 nach Fläche bei Fluoreszenzmessung; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Fläche	T1	T2	T3	T4
oral	7,2 (0,05; 44,2)	6,0 (0,55; 42,2)	6,9 (0,36; 44,3)	5,2 (0,02; 48,1)
vestibulär	2,6 (0,00; 60,2)	3,4 (0,00; 44,9)	3,6 (0,00; 48,8)	2,2 (0,00; 36,6)

4.3.3 Auswertung nach Fläche und Kiefer

Im Ober- und Unterkiefer traten insgesamt ähnliche Effekte auf.

Bei Oralflächen des Oberkiefers lagen die medianen Bedeckungswerte zu T1 und T2 bei sehr ähnlichen 4,0% bzw. 3,9% und zeigten zu T3 einen leichten Anstieg auf 4,8%. Mit 3,7% lagen die Werte zu T4 minimal unterhalb derer zu T1 und T2. Im Unterkiefer zeigten sich bei T1 mit 11,4% sowie T2 und T3 mit jeweils 10,6% insgesamt ähnliche Werte; bei T4 trat eine geringere Bedeckung von 7,9% auf.

Die medianen Messwerte der Vestibulärflächen von Ober- und Unterkiefer zeigten von T1 (2,4% bzw. 2,8%) über T2 (3,7% bzw. 3,1%) zu T3 (4,6% bzw. 3,3%) eine Zunahme sowie zu T4 (2,0% bzw. 2,3%) eine Degression unter den ursprünglichen Wert bei T1. Dieser Effekt war im Oberkiefer deutlicher als im Unterkiefer, wo zwischen T2 und T3 keine signifikanten Unterschiede auftraten (Tabelle 9).

Tabelle 9: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 nach Fläche und Kiefer bei Fluoreszenzmessung; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Kiefer	T1	T2	T3	T4
Oralflächen				
Oberkiefer	4,0 (0,11; 27,4)	3,9 (0,88; 26,1)	4,8 (0,36; 30,5)	3,7 (0,42; 44,2)
Unterkiefer	11,4 (0,05; 44,2)	10,6 (0,55; 42,2)	10,6 (1,1; 44,3)	7,9 (0,02; 48,1)
Vestibulärflächen				
Oberkiefer	2,4 (0,00; 60,2)	3,7 (0,00; 44,9)	4,6 (0,00; 48,8)	2,0 (0,00; 36,6)
Unterkiefer	2,8 (0,00; 19,8)	3,1 (0,00; 13,3)	3,3 (0,00; 24,1)	2,3 (0,00; 11,7)

4.3.4 Auswertung nach Fläche, Kiefer und Zahn

Bei Betrachtung der einzelnen Zahngruppen traten, im Gegensatz zur Betrachtung über alle Flächen hinweg (vgl. 4.3.1), lediglich bei Vestibulärflächen von Oberkieferfrontzähnen, -prämolaren und -molaren und Unterkieferfrontzähnen zwischen T3 und

T4 signifikante Unterschiede der medianen Bedeckung auf (Tabelle 10). So sank die mediane Bedeckung bei Oberkieferfrontzähnen von 0,31% auf 0,13%, bei Oberkieferprämolaren von 6,4% auf 2,4%, bei Oberkiefermolaren von 11,1% auf 6,4% sowie bei Unterkieferfrontzähnen von 0,43% auf 0,31%. Abgesehen davon waren keine signifikanten Befunde festzustellen. Die grafische Darstellung der Ergebnisse ist Abbildung 16 zu entnehmen.

Tabelle 10: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 nach Fläche, Kiefer und Zahn bei Fluoreszenzmessung; • = signifikanter Unterschied zwischen T1 und T3, ♦ = signifikanter Unterschied zwischen T3 und T4; Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent

Zahn	T1	T2	T3	T4
Oberkiefer-Orallflächen				
Frontzahn	2,1 (0,11; 16,6)	2,7 (0,88; 16,5)	3,0 (0,36; 28,7)	2,4 (0,63; 21,8)
Prämolar	4,7 (0,91; 23,3)	5,3 (1,3; 21,8)	5,7 (0,72; 25,8)	4,8 (0,42; 19,1)
Molar	5,6 (0,58; 27,4)	4,9 (1,4; 26,1)	5,2 (0,83; 30,5)	4,0 (0,71; 44,2)
Unterkiefer-Orallflächen				
Frontzahn	8,9 (0,05; 44,2)	3,4 (0,55; 30,0)	5,5 (1,1; 43,1)	5,0 (0,02; 36,4)
Prämolar	11,4 (1,0; 39,1)	15,2 (3,6; 42,1)	15,1 (1,7; 37,3)	8,3 (0,68; 32,3)
Molar	13,9 (1,6; 41,6)	13,2 (1,6; 42,2)	11,8 (1,9; 44,3)	10,6 (0,81; 48,1)
Oberkiefer-Vestibulärflächen				
Frontzahn	0,05 (0,00; 2,8)	0,18 (0,00; 5,6)	0,31 (0,00; 6,6)	0,13 (0,00; 1,1) ♦
Prämolar	2,6 (0,5; 28,7)	4,4 (0,87; 30,5)	6,4 (1,3; 29,4)	2,4 (0,48; 18,2) ♦
Molar	6,8 (1,7; 60,2)	8,6 (1,9; 44,9)	11,1 (2,4; 48,8)	6,4 (1,7; 36,6) ♦
Unterkiefer-Vestibulärflächen				
Frontzahn	0,30 (0,00; 19,8)	0,47 (0,00; 10,5)	0,43 (0,00; 24,1)	0,31 (0,00; 8,1) ♦
Prämolar	2,3 (0,40; 8,0)	3,2 (0,34; 11,7)	3,4 (0,26; 13,9)	2,3 (0,24; 6,4)
Molar	5,4 (1,5; 16,3)	6,9 (1,6; 13,3)	6,3 (1,1; 21,3)	5,2 (1,4; 11,7)

4.4 Übersichtsdiagramm

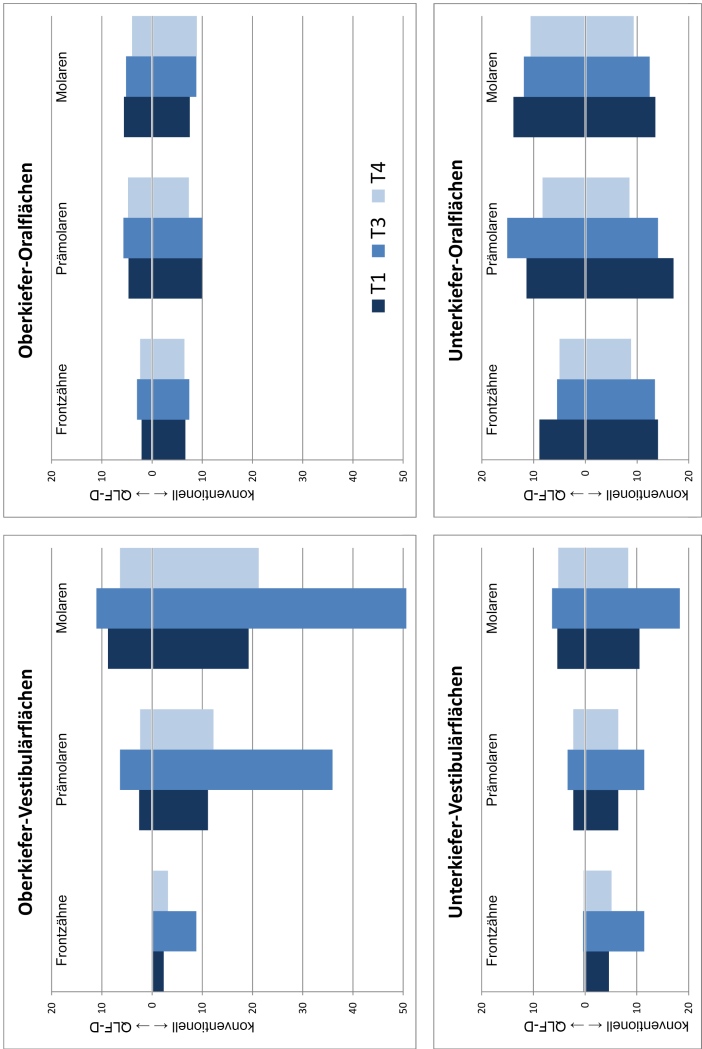


Abbildung 16: Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Methoden zu T1, T3 und T4 (konventionell: konventionelle Messung nach Anfängen; QLF-D: Fluoreszenzmessung). Aus Gründen der Übersicht wurde auf die Darstellung von Streuungsmaßen verzichtet. Die Mediane, Minima und Maxima können den Tabellen 7 und 10 entnommen werden.

4.5 Vergleich der Methoden

4.5.1 Gesamtbetrachtung

Während bei Vestibulärflächen generalisiert über alle Zahngruppen und Termine hinweg signifikante Unterschiede zwischen den Messmethoden erkennbar waren, zeigte sich bei Betrachtung der Oralflächen ein differenzierteres Bild. Hier traten signifikante Unterschiede bei Oberkieferfrontzähnen zu T1 und zu T3 sowie bei Unterkieferfrontzähnen und Oberkieferprämolaren zu T3 auf. Tabelle 11 stellt die medianen Bedeckungswerte bei konventioneller Messung nach Anfärben und bei Fluoreszenzmessung mittels QLF-D gegenüber.

Tabelle 11: Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Methoden (konv.: konventionelle Messung nach Anfärben; QLF-D: Fluoreszenzmessung); Werte angegeben als \bar{x} (min, max) in Prozent. Fettschrift zeigt einen signifikanten Unterschied zwischen konventioneller Plaquemessung nach Anfärben und Fluoreszenzmessung an.

	T1	T2	T3	T4
Gesamtbetrachtung				
konv.	9,4 (0,3; 66,3)	-	13,3 (0,7; 72,2)	7,9 (0,02; 72,3)
QLF-D	4,1 (0,00; 60,2)	4,6 (0,00; 44,9)	5,0 (0,00; 48,8)	3,5 (0,00; 48,1)
Oralflächen				
Oberkieferfrontzähne				
konv.	6,6 (0,28; 40,9)	-	7,4 (1,0; 58,5)	6,4 (0,33; 46,3)
QLF-D	2,1 (0,11; 16,6)	2,7 (0,88; 16,5)	3,0 (0,36; 28,7)	2,4 (0,63; 21,8)
Unterkieferfrontzähne				
konv.	14,0 (0,76; 61,5)	-	13,4 (2,1; 55,6)	8,8 (0,02; 72,3)
QLF-D	8,9 (0,05; 44,2)	3,4 (0,55; 30,0)	5,5 (1,1; 43,1)	5,0 (0,02; 36,4)
Oberkieferprämolaren				
konv.	9,9 (2,7; 18,8)	-	9,9 (4,2; 18,2)	7,3 (3,2; 26,2)
QLF-D	4,7 (0,91; 23,3)	5,3 (1,3; 21,8)	5,7 (0,72; 25,8)	4,8 (0,42; 19,1)
Unterkieferprämolaren				
konv.	17,0 (0,88; 48,9)	-	14,0 (1,2; 44,3)	8,5 (0,83; 31,0)
QLF-D	11,4 (1,0; 39,1)	15,2 (3,6; 42,1)	15,1 (1,7; 37,3)	8,3 (0,68; 32,3)
Oberkiefermolaren				
konv.	7,5 (0,91; 16,1)	-	8,8 (2,1; 18,3)	8,9 (0,91; 23,5)
QLF-D	5,6 (0,58; 27,4)	4,9 (1,4; 26,1)	5,2 (0,83; 30,5)	4,0 (0,71; 44,2)
Unterkiefermolaren				
konv.	13,5 (0,92; 39,0)	-	12,4 (2,2; 37,7)	9,3 (0,11; 34,8)
QLF-D	13,9 (1,6; 41,6)	13,2 (1,6; 42,2)	11,8 (1,9; 44,3)	10,6 (0,81; 48,1)

Differenz konv.-QLF-D				
	3,3 (-25,0; 54,0)	-	3,1 (-9,9; 58,1)	2,3 (-5,9; 43,9)
Vestibulärflächen				
Oberkieferfrontzähne				
konv.	2,3 (0,29; 11,6)	-	8,8 (0,69; 43,8)	3,3 (0,69; 16,9)
QLF-D	0,05 (0,00; 2,8)	0,18 (0,00; 5,6)	0,31 (0,00; 6,6)	0,13 (0,00; 1,1)
Unterkieferfrontzähne				
konv.	4,6 (0,27; 58,2)	-	11,4 (2,7; 45,4)	5,1 (0,18; 24,3)
QLF-D	0,30 (0,00; 19,8)	0,47 (0,00; 10,5)	0,43 (0,00; 24,1)	0,31 (0,00; 8,1)
Oberkieferprämolaren				
konv.	11,1 (2,1; 52,1)	-	35,9 (3,3; 69,2)	12,2 (2,3; 62,1)
QLF-D	2,6 (0,5; 28,7)	4,4 (0,87; 30,5)	6,4 (1,3; 29,4)	2,4 (0,48; 18,2)
Unterkieferprämolaren				
konv.	6,4 (0,89; 31,2)	-	11,4 (1,5; 33,7)	6,4 (1,1; 23,3)
QLF-D	2,3 (0,40; 8,0)	3,2 (0,34; 11,7)	3,4 (0,26; 13,9)	2,3 (0,24; 6,4)
Oberkiefermolaren				
konv.	19,2 (3,8; 66,3)	-	50,6 (8,6; 72,2)	21,2 (2,9; 67,2)
QLF-D	6,8 (1,7; 60,2)	8,6 (1,9; 44,9)	11,1 (2,4; 48,8)	6,4 (1,7; 36,6)
Unterkiefermolaren				
konv.	10,5 (2,7; 41,4)	-	18,3 (11,9; 41,9)	8,3 (2,7; 29,6)
QLF-D	5,4 (1,5; 16,3)	6,9 (1,6; 13,3)	6,3 (1,1; 21,3)	5,2 (1,4; 11,7)
Differenz konv.-QLF-D				
	4,6 (-3,8; 53,3)	-	15,1 (-9,9; 58,7)	5,9 (-5,9; 43,9)

Die folgenden Bland-Altman-Plots (Abbildungen 17–19) dienen der Illustration der Übereinstimmung der Methoden beim ersten, dritten und vierten Termin unabhängig von Fläche und Kiefer für alle Messwertpaare. Diese Darstellung wurde zur besseren Anschaulichkeit der Übereinstimmung in Abhängigkeit von der Dimension der Messwerte gewählt. Die durchgezogenen Linien stellen jeweils den arithmetischen Mittelwert der Differenzen, die gestrichelten Linien den arithmetischen Mittelwert der Differenzen $\pm 1,96 \times$ Standardabweichung dar.

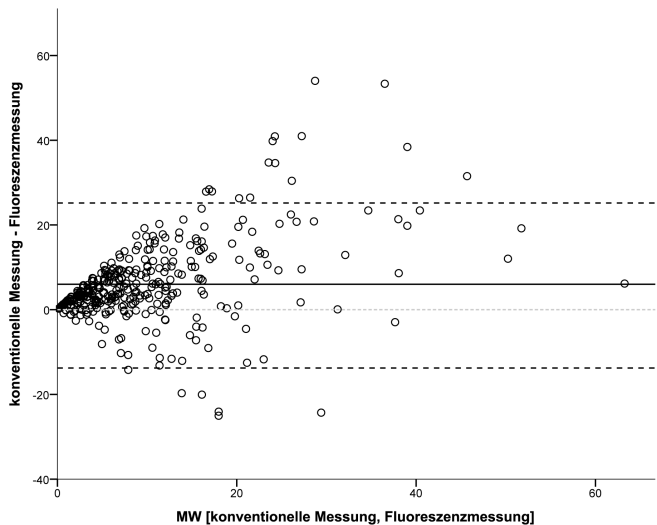


Abbildung 17: Bland-Altman-Plot zu T1, alle Messwerte; MW = arithmetischer Mittelwert

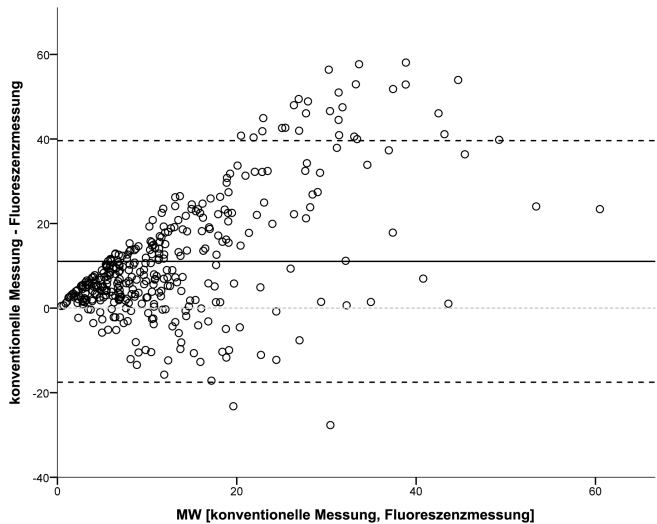


Abbildung 18: Bland-Altman-Plot zu T3, alle Messwerte; MW = arithmetischer Mittelwert

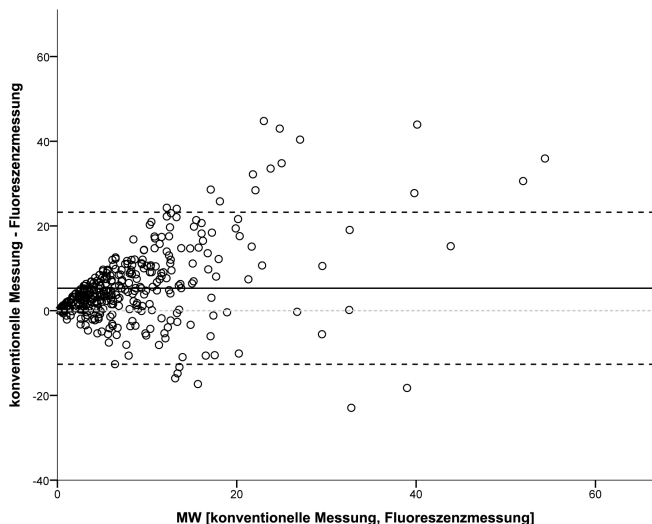


Abbildung 19: Bland-Altman-Plot zu T4, alle Messwerte; MW = arithmetischer Mittelwert

Hierbei zeigten sich deutliche systematische Fehler. So waren die Werte bei Fluoreszenzmessung im Mittel bei T1 um 6,0%; bei T3 um 11,1% und bei T4 um 5,4% geringer als bei konventioneller Messung nach Anfärben ($p \leq 0,001$). Weiterhin zeigte sich bei höheren Bedeckungswerten eine zunehmende Streuung.

Neben Bland-Altman-Plots wurden auch Korrelationskoeffizienten betrachtet; zwischen den Werten aus beiden Messmethoden bestand geringe bis mittlere Korrelation (Tabelle 12).

Tabelle 12: Korrelationskoeffizienten zwischen den Messmethoden ($p \leq 0,001$)

Flächen	$r_s(T1)$	$r_s(T3)$	$r_s(T4)$
alle	0,62	0,40	0,52
vestibulär	0,73	0,63	0,63
oral	0,53	0,47	0,48

Dabei zeigten sich deutliche interindividuelle Unterschiede, deren Ausprägung zu den Untersuchungszeitpunkten unterschiedlich war. So bestand zu T1 bei 10 Proband(inn)en eine eher hohe ($r_s \geq 0,8$), bei 7 Proband(inn)en eine mittlere ($0,6 \leq r_s < 0,8$) und bei 13 Proband(inn)en eine eher geringe ($r_s \leq 0,6$) Korrelation. Zu T3 bestand bei einer Probandin eine eher hohe ($r_s \geq 0,8$), bei 10 Proband(inn)en eine mittlere ($0,6 \leq$

$r_s < 0,8$) und bei 19 Proband(inn)en eine eher geringe ($r_s \leq 0,6$) Korrelation. Ferner bestand zu T4 bei 7 Proband(inn)en eine eher hohe ($r_s \geq 0,8$), bei 3 Proband(inn)en eine mittlere ($0,6 \leq r_s < 0,8$) und bei 19 Proband(inn)en eine eher geringe ($r_s \leq 0,6$) Korrelation.

4.5.2 Übereinstimmung bei eher niedriger Plaquedeckung

Die folgenden beiden Bland-Altman-Plots (Abbildungen 20 und 21) dienen der Illustration der Übereinstimmung zwischen konventioneller Plaquemessung nach Anfärben und Fluoreszenzmessung bei eher niedriger Plaquedeckung. Dazu wurden nur die Messwertpaare des ersten Termins in Abhängigkeit von Zahnfläche und Kiefer berücksichtigt, bei denen der Bedeckungswert bei konventioneller Messung nach Anfärben bei $\leq 10\%$ lag. Zur besseren Veranschaulichung sind die Messwertpaare von Ober- und Unterkiefer in unterschiedlichen Farben dargestellt.

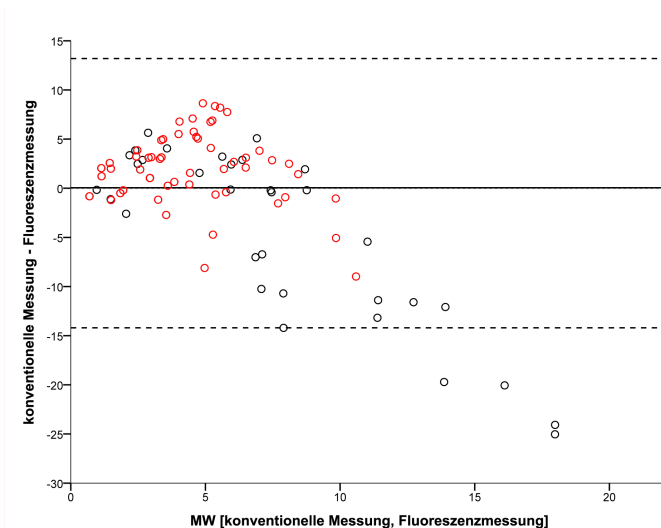


Abbildung 20: Bland-Altman-Plot der Oralfächen zu T1, Plaquedeckung $\leq 10\%$ bei konventioneller Messung nach Anfärben; \circ : Messwertpaare des Oberkiefers, \circ : Messwertpaare des Unterkiefers; MW = arithmetischer Mittelwert

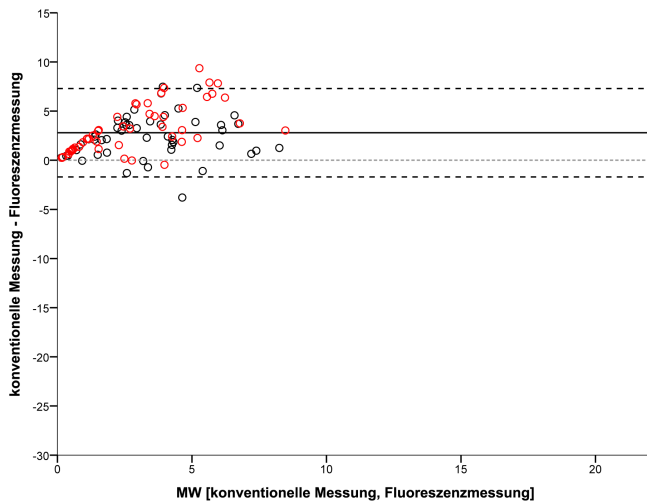


Abbildung 21: Bland-Altman-Plot der Vestibulärflächen zu T1, Plaquebedeckung $\leq 10\%$ bei konventioneller Messung nach Anfärben; \circ : Messwertpaare des Oberkiefers, \circ : Messwertpaare des Unterkiefers; MW = arithmetischer Mittelwert

Sowohl bei Oral- (Abbildung 20) als auch bei Vestibulärflächen (Abbildung 21) zeigten sich systematische Fehler. Insgesamt waren diese bei isolierter Betrachtung der Messwertpaare mit geringer Plaquebedeckung ($\leq 10\%$ bei konventioneller Messung nach Anfärben) unabhängig von Zahnfläche und Kiefer geringer als die Fehler bei Betrachtung aller Messwertpaare des ersten Termins (Abbildung 17).

Bei eher niedriger Plaquebedeckung ($\leq 10\%$ bei konventioneller Messung nach Anfärben) zeigte sich mit $r_s = 0,45$ zu T1, $r_s = 0,34$ zu T3 und $r_s = 0,45$ zu T4 (jeweils $p \leq 0,001$) eine etwas bessere Korrelation der Messmethoden als bei eher hoher Plaquebedeckung ($> 10\%$ bei konventioneller Messung nach Anfärben), bei welcher die Korrelation zu T1 $r_s = 0,41$ ($p \leq 0,001$), zu T3 $r_s = 0,19$ ($p \leq 0,05$) und zu T4 $r_s = 0,32$ ($p \leq 0,001$) betrug.

5 Diskussion

5.1 Funktionsprinzip QLF und QLF-D

5.1.1 Software und Fototechnik

Dem QLF-D Biluminator liegt ein aus zwei Programmen bestehendes Softwarepaket bei. Dabei handelt es sich um C3 (Inspektor Research Systems BV, Amsterdam, Niederlande) zur Anfertigung sowie um QA2 (Inspektor Research Systems BV, Amsterdam, Niederlande) zur Auswertung von Fluoreszenzfotos. Bei der Nutzung von C3 erfolgt nach Festlegung der Einstellungen das Auslösen der Kamera per Mausklick, wobei nacheinander ein konventionelles und ein Fluoreszenzfoto angefertigt werden. Werden die Standardeinstellungen beibehalten, erfolgen die Aufnahmen mit einer Empfindlichkeit von ISO 1600 und einer Belichtungszeit von 1/30 Sekunde. Während die Fotos bei normaler Beleuchtung bei einem Blendenwert von f8.0 sowie einem manuell auf eine Temperatur von 2000 K und eine Tönung von -8 angepassten Weißabgleich angefertigt werden, erfolgt die Anfertigung der Fluoreszenzfotos bei Blende f5.6 und WeißabgleichEinstellung „Tageslicht“, was einer Temperatur von 5200 K sowie einer Tönung von +3 gleichkommt. Die Bildqualität ist unter Standardeinstellungen auf „small fine“ eingestellt, was einer Größe von 2592 x 1728 Pixeln entspricht. Da die Fotos als Bitmap-Dateien übertragen werden, beträgt die Dateigröße 13,4 MB pro Foto (alle Angaben beziehen sich auf Software-Version 1.05). Nach Fertigstellung der Aufnahmen erfolgt ein direkter Import in einen Fotokatalog. Im Anschluss können die Fotos mittels QA2 hinsichtlich White-Spots und Plaquebedeckung analysiert werden.

Die Aufnahme der Fotografien mit C3 bringt einige praktische Einschränkungen mit sich. Weil die Auslösung per Mausklick an einem PC oder Notebook erfolgt, müsste bei klinischer Anwendung die Kamera einhändig gehalten werden. Daher kann auf Grund des Risikos von Verwacklungsunschärfe, falls die Auslösung nicht durch eine assistierende Person erfolgt, auf die Verwendung eines Statives nicht verzichtet werden. Weiterhin vergehen sowohl zwischen dem Mausklick und der tatsächlichen Auslösung des ersten Fotos, als auch zwischen dem ersten und dem zweiten Foto mehrere Sekunden. Diese Zeit wird durch Erhöhung der Auflösung von standardmäßig in C3 eingestellten kleinstmöglichen 2592 x 1728 Pixeln im Bitmap-Format auf 5184 x 3456 Pixel, der beim verwendeten Kameragehäuse bestmöglichen Einstellung, noch wesentlich verlängert. Es ist anzunehmen, dass dies durch die Übertragung mittels langsamer USB1-Verbindung hervorgerufen wird. Auf Grund dessen ist der Moment der

Auslösung nicht exakt vorhersehbar und es ist praktisch nahezu unmöglich, Veränderungen des Fokusabstandes und der Position der Proband(inn)en für diesen mehrere Sekunden langen Zeitraum auszuschließen. Häufig resultieren fehlfokussierte und/oder verwackelte Fotos. Auch zeigte die Analysesoftware QA2 insbesondere im Seitenzahngebiet eine unzuverlässige Erfassung fluoreszierender Oberflächen mit der Folge falsch niedriger Plaquebedeckungswerte (vgl. Abbildung 22). Weiterhin verzichtet das Gerät auf einen internen Stromspeicher und kann daher nur im Netzbetrieb verwendet werden.

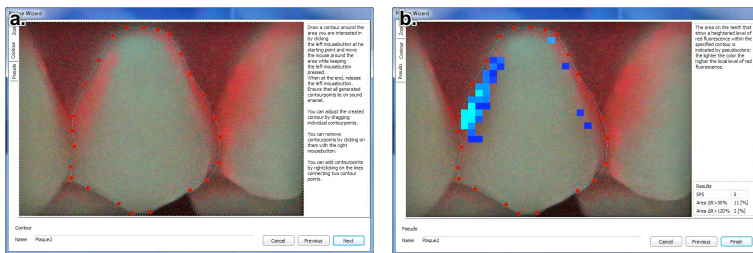


Abbildung 22: Auswertung mit QA2 1.05, a.: Flächenauswahl, b.: insuffiziente Erkennung fluoreszierender Areale insbesondere im rechten Approximalbereich

Ebenso ist eine Erfassung im Rohdatenformat nicht vorgesehen, obwohl dieses hinsichtlich Bildqualität und Weiterverarbeitungsmöglichkeiten viele Vorteile gegenüber dem Bitmap- und JPEG-Format besitzt (vgl. 5.3.3).

Ein weiteres Nadelöhr des QLF-D Biluminator stellt das verwendete Kameragehäuse (EOS 550D; Canon, Tokio, Japan) selbst dar. Es handelt sich dabei um ein Gerät aus der Einstiegsklasse, welches im März 2010 eingeführt wurde. Schon bei der Markteinführung zeigte das Gehäuse im Vergleich zu Geräten für die semiprofessionelle und professionelle Anwendung Defizite bei der Bildqualität und beim Autofokus. Insbesondere das auf Grund der verglichen mit Vollformatsensoren geringeren Größe und damit höheren Pixeldichte des verwendeten APS-C-Sensors deutlich sichtbare Bildrauschen bei hoher Empfindlichkeitseinstellung [Nikon Corp., abgerufen am 28.05.2018], welche bei der Anfertigung von Fluoreszenzfotos notwendig ist, erschwert die Auswertung.

Beim Hersteller Canon waren zur Einführung des QLF-D Biluminators alternativ als semiprofessionelle Gehäuse die Modelle EOS 50D und EOS 60D sowie als professionelle Gehäuse die Modelle EOS 1Ds Mark III, EOS 1D Mark IV, EOS 5D Mark II und EOS 7D als Alternativen verfügbar. Dabei ist zu beachten, dass das beim QLF-D Bi-

luminator verwendete Makro-Objektiv (EF-S 60 mm f2.8 Macro USM; Canon, Tokio, Japan) über ein EF-S-Bajonett verfügt. Es kann daher an Gehäusen mit Vollformatsensor, über welchen Modelle für die professionelle Anwendung in der Regel verfügen (EOS 7D stellt hier eine Ausnahme dar), nicht verwendet werden. Alternativ kämen die Objektive EF 100 mm f2.8 Macro USM oder EF 100 mm f2.8 L Macro IS USM, letzteres aus der für den professionellen Gebrauch vorgesehenen L-Serie, in Betracht. Die abweichende Brennweite ergibt sich, da auf Grund des Formatfaktors 1,6 bei Gehäusen mit APS-C-Sensor der Bildausschnitt eines Objektivs mit 60 mm Brennweite verglichen mit dem eines Objektivs der Brennweite 100 mm an einem Vollformatgehäuse nahezu identisch ist.

Insbesondere angesichts der offenkundigen Verbesserungen hinsichtlich des Bildrauschens aktueller Modelle würde die Verwendung eines geeigneteren Gehäuses die Handhabung erleichtern und die Qualität der Ergebnisse deutlich verbessern. Aktuelle Sensoren bieten eine Erweiterung der Empfindlichkeit auf ein Vielfaches des Maximalwertes der beim QLF-D Biluminator verwendeten EOS 550D, welcher bei ISO 12800 liegt. Die Verwendung eines aktuellen Profigeräts würde daher auch Möglichkeiten zur Verkürzung der Belichtungszeit zur Vermeidung von Verwacklungs- und Bewegungsunschärfe und zum Schließen der Blende unter Vergrößerung des Schärfereiches schaffen. Dies könnte insbesondere die klinische Anwendung bei Verzicht auf Hilfsmittel wie Kinn-/Stirnstütze und Stativ deutlich erleichtern.

5.1.2 Studienkritik

Frühere Untersuchungen, welche unter 2.3.2 ausführlich vorgestellt wurden, gewähren verschiedenste Erkenntnisse zum Thema der Autofluoreszenz dentaler Plaque; die Ergebnisse sollten jedoch kritisch betrachtet werden.

So scheint sich die metabolische Aktivität von Bakterien im etablierten Biofilm hinsichtlich Autofluoreszenz emittierender Stoffe von der in Monokulturen zu unterscheiden [van der Veen et al., 2006], weshalb die Ergebnisse von In-vitro-Studien nur mit Einschränkungen auf den von hochkomplexen Wechselwirkungen geprägten Biofilm in vivo übertragen werden können. Die genauen Zusammenhänge hinsichtlich des Einflusses des verwendeten Kulturmediums auf die Autofluoreszenz einzelner Spezies [Volgenant et al., 2013; Volgenant et al., 2012] sind bisher ungeklärt und die beschriebenen Untersuchungen von Lee et al., Kim et al., und Volgenant et al. haben gemeinsam, dass sich auf Grund der massiven Saccharosezufuhr die metabolische Aktivität der Bakterien im Versuch deutlich von der metabolischen Aktivität von Bakterien unter

physiologischen klinischen Bedingungen unterscheidet. Ein Vergleich zur Plaquebildung in vivo ist daher nur bedingt möglich. Ähnlich wie bei den beschriebenen Studien ist auch in der In-vivo-Studie von Bittar et al. von einer hochaggressiven Plaque auszugehen, deren Eigenschaften auf Grund qualitativer und quantitativer Unterschiede zu unter physiologischen Umständen gebildeter Plaque nur bedingt auf diese übertragbar sind.

Die Relevanz der Ergebnisse von Pretty et al. ist eingeschränkt, da auf die Anfertigung konventioneller Fotos nach Anfärben verzichtet wurde und somit kein Vergleich zu etablierten Methoden der Plaquemessung erfolgte, während die klinische Relevanz des Vergleiches von Fluoreszenzfotos vor und nach Anfärben zweifelhaft erscheint [Pretty et al., 2005]. Bei der Untersuchung von Sadeq et al. wurde nur das Vorhandensein von Initialläsionen und Plaque gewertet, nicht aber deren Relation und Ausdehnung verglichen, sodass direkte Rückschlüsse schwierig sind. Die mediane Größe der Initialläsionen lag weiterhin bei geringen 0,76 mm², sodass es sich auch um Artefakte gehandelt haben könnte. Auch putzten die Probanden vor der Untersuchung die Zähne, was an dieser Stelle nicht nachvollziehbar ist. Bei den Studien von Han et al. ist zu beachten, dass auf die Schaffung einer Baseline verzichtet wurde und somit der individuelle Reifegrad der Plaque unbekannt ist. Eine Limitation der 2016 von van der Veen et al. durchgeführten Studie liegt darin, dass vor Beginn der Monitoringphase keine Zahnreinigung erfolgte. So ist nicht von einer initialen Plaquebesiedlung und -reifung, sondern von einer fortschreitenden Reifung der bereits vor Beginn der Monitoringphase etablierten Plaque auszugehen. Der Reifegrad ist daher individuell sehr variabel, weshalb Rückschlüsse auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Intensität der Fluoreszenz und dem absoluten Reifegrad der Plaque kritisch zu betrachten sind. Der Genauigkeit des von Volgenant et al. 2016 angewandten Studiendesigns sind Grenzen gesetzt, da zum Vergleich der Methoden auf eine sich anhand der angefertigten Fotos anbietende prozentuale Bedeckungsanalyse verzichtet wurde und stattdessen ordinal skalierte, hinsichtlich der Differenzierungsstärke begrenzte Plaqueindizes verwendet wurden [Quirynen et al., 1991].

Zusammenfassend zeigt sich, dass bisherige In-vitro-Studien das Vorkommen von Autofluoreszenzphänomenen in dentaler Plaque belegen konnten. Dabei wurden unterschiedlichste Methoden und Keimspektren angewendet und untersucht, was die Vergleichbarkeit der Ergebnisse einschränkt. Die genauen Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Keimspezies bezüglich der Charakteristik der Autofluoreszenz und somit auch weitere Fragestellungen, beispielsweise nach der Pathogenität fluoreszierender Plaque, sind daher noch nicht ausreichend geklärt. Auch der Einfluss

verschiedener Kulturmedien auf die Intensität der Fluoreszenz fand bisher nur wenig Beachtung. Weiterhin bestehen trotz der bisherigen Proband(inn)enstudien ungeklärte Fragestellungen zum Thema Autofluoreszenz in vivo. Bisherige Untersuchungen beschränken sich meist auf Vestibulärflächen von Front- und Eckzähnen, obwohl weitere Areale des Zahnbogens auf Grund qualitativer und quantitativer Unterschiede der Plaque innerhalb der Mundhöhle und deren Einfluss auf Autofluoreszenzphänomene von großem Interesse sind. Weiterhin sind die unterschiedlichen genutzten Validierungsverfahren mit den beschriebenen Mängeln behaftet. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vorliegenden Publikationen Fluoreszenzphänomene und eine mögliche Assoziation mit pathogener Plaque aufzeigen, deren klinische Relevanz aber weiterhin unklar ist.

5.2 *Herkömmliche Indizes und planimetrische Verfahren*

Die unter 2.2.1 vorgestellten klinischen Indizes zeigen durch unterschiedliche Gewichtung, Empfindlichkeit und Trennschärfe Eignung für verschiedenste klinische und wissenschaftliche Fragestellungen. Gemeinsame Vorteile klinischer Plaqueindizes sind die schnelle und einfache klinische Anwendbarkeit und der geringe apparative Aufwand. Allerdings sind die vorgestellten und auch andere Plaqueindizes mit verschiedenen Nachteilen behaftet. So erfordern Plaqueindizes bei der anhand der Quantität und Lokalisation der Plaque durchgeführten Auswahl des Grades immer eine persönliche Zuordnung, wodurch sich trotz Untersucherkalibrierung eine teilweise subjektive Bewertung nicht ausschließen lässt [Soder et al., 1993]. Weiterhin sind der Genauigkeit durch die Ordinalskalierung und die zumeist geringe Anzahl der Einteilungsgrade Grenzen gesetzt. Eine genauere Einteilung unter Erhöhung der Graduierung geht häufig mit einer geringeren Reproduzierbarkeit einher. So können genaue wachstumsmorphologische Muster, wie beispielsweise die Ausbreitung in Relation zu anatomischen Strukturen, oft nur ungenau erkannt und bewertet werden [Soder et al., 2003]. Ferner unterscheiden sich die Wachstumskurven in Abhängigkeit vom verwendeten Index, da die Graduierung der Indizes, verglichen mit dem zeitlichen Ablauf physiologischen Plaquewachstums, stark differiert. So kommen neben linearen auch exponentielle und S-förmige Funktionsgraphen vor [Quirynen et al., 1991], was die Interpretation und die Vergleichbarkeit der Indexwerte erschwert.

Bei planimetrischen Verfahren hingegen zeigt sich insbesondere bei automatisierter Auswertung nur geringe Anfälligkeit für Messungenauigkeiten, da dabei der einzige manuelle Schritt neben dem Erstellen des Fotos in der Auswahl der entsprechenden

Fläche besteht (vgl. 4.1.1). Selbst stärkere fotografische Abweichungen in Form von Schwankungen des Abstandes und der Horizontal- und Vertikalachse werden sowohl bei direkter Aufnahme als auch bei Fotografie nicht direkt einsehbarer Zahnflächen über Fotospiegel sehr gut toleriert [Soder et al., 1993], weshalb es möglich ist, fotografisch nur indirekt zugängliche Bereiche der Mundhöhle präzise auszuwerten. Weiterhin lässt sich auf Grund der Verhältnisskalierung eine höchstmögliche Genauigkeit ohne Skalierungsfehler erzielen, wodurch sich, ein geeignetes Aufnahmesystem vorausgesetzt, auch geringe Bedeckungsänderungen zuverlässig und reproduzierbar erfassen lassen. Von Nachteil bei planimetrischen Verfahren sind der apparative Aufwand, bestehend aus Foto- und Auswertungstechnik sowie der erhöhte Zeitbedarf bei der Anfertigung und Auswertung der Fotografien.

Somit ist davon auszugehen, dass planimetrische Verfahren zwar aufwendig, jedoch den klinischen Indizes hinsichtlich Genauigkeit, Objektivität und Reproduzierbarkeit überlegen sind und somit gute Eignung für verschiedenste Anwendungsprofile im Rahmen klinischer Studien aufweisen. Bei der Auswahl einer geeigneten Methode zur Plaquemessung sollte daher immer die Möglichkeit der planimetrischen Messung in Betracht gezogen werden.

5.3 Methodenkritik

5.3.1 Studiendesign

Das Studiendesign ermöglichte sowohl die Darstellung der Plaquebedeckung unter habitueller Mundhygiene als auch das Monitoring von Plaquewachstum. Es wurden grundsätzlich vier unterschiedlich charakterisierte Plaquebedeckungszustände untersucht: über einen längeren Zeitraum unter habitueller Mundhygiene etablierte Plaque, de novo gewachsene Plaque im Stadium nach 48 und 72 Stunden bei Verzicht auf Mundhygiene sowie unter habitueller Mundhygiene über einen definierten Zeitraum (4–6 Wochen) etablierte Plaque.

Zweck der Messungen unter habitueller Mundhygiene war die Beurteilung von Plaque, welche sich an Prädispositionsstellen über einen längeren Zeitraum etablieren konnte. Dazu erfolgte eine Messung beim ersten Termin vor Beginn des Monitorings und eine weitere Messung nach Ende des Monitorings. Auf die Festlegung eines genauen Zeitpunktes wurde aus logistischen Gründen verzichtet; ein Abstand von 4–6 Wochen er-

schien hier sowohl zur Wiederherstellung einer stabilen individuellen Bakterienflora als auch zur Beurteilung des Studieneffektes auf das Mundhygieneverhalten geeignet. Das Wachstum frischer, zunächst unreifer Plaque nach Herstellung vollständiger Plaquefreiheit (professionelle Zahnreinigung) wurde mittels Monitoring über 72 Stunden hinweg beobachtet. Die erste Fluoreszenzmessung erfolgte nach 48 Stunden ungestörten Plaquewachstums, da zu einem früheren Zeitpunkt keine fluoreszierende Plaque zu erwarten ist [Kim et al., 2014]. Da bei Anfärben der Plaque eine Störung der weiteren Plaquebildung, beispielsweise durch mögliche antibakterielle Effekte, nicht hätte ausgeschlossen werden könnten, durch das Anfärben die isolierte Erstellung eines Fluoreszenz-Fotostatus in der Folgesitzung wegen möglicher Färbungsreste nur bedingt möglich gewesen wäre und das Entlassen der Proband(inn)en mit angefärbter Plaque auf Grund der sozialen Einschränkungen ethisch fraglich gewesen wäre, wurde in dieser Sitzung auf Anfärben und die Erstellung eines standardisierten konventionellen Fotostatus verzichtet. Die Monitoringphase wurde mit einer weiteren Messung nach 72 Stunden beendet, um Schädigungen an Zahnhartsubstanz, Weichgewebe und Parodontium zu vermeiden.

Zur Darstellung der Plaque bei konventioneller Messung wurde ein zweifarbiger Revelator (Mira-2-Ton®, siehe 3.5.1) verwendet, um den Reifegrad der Plaque differenzieren zu können. Allerdings kam es nur bei 6% der untersuchten Flächen (65 von insgesamt 1080 Flächen) nach Anfärben zu einer auf fortgeschrittene Reife hindeutenden flächigen Blaufärbung, sodass von einer gesonderten Analyse abgesehen wurde. Um Quenching-Effekte (Fluoreszenzlöschung) zu vermeiden, erfolgte das Anfärben zu den jeweiligen Terminen ausschließlich erst nach abgeschlossener Fluoreszenzmessung. Obwohl die Plaquemessung nach Applikation eines Plaquerevelators den Goldstandard darstellt, ist die Studienlage zur genauen Wirkungsweise vergleichsweise dürtig und beschränkt sich auf Untersuchungen unter Verwendung älterer, bereits nicht mehr im Handel verfügbarer Produkte [Block et al., 1972; Gallagher et al., 1977]. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass durch den Revelator auch Beläge, die nicht der Definition von Plaque entsprechen, wie die locker anhaftende *Materia alba* oder Nahrungsreste angefärbt werden. Diese Problematik besteht bei allen Verfahren, bei denen zur Darstellung der Plaque Revelatoren notwendig sind. Bei Plaquemessung mittels QLF-D sind derartige Fehlmessungen unwahrscheinlich, da die für messbare Fluoreszenz notwendigen Spezies offenbar nur in strukturierter Plaque fortgeschrittenen Reifegrades in ausreichender Anzahl vorhanden bzw. zur Ausscheidung von PpIX befähigt sind [Volgenant et al., 2016a].

5.3.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch war in allen Bereichen ohne Schwierigkeiten durchführbar.

Intra- und Interrater-Reliabilität wurden durch Versuche zur Reproduzierbarkeit und durch Mehrfachauswertungen geprüft (vgl. 4.1.1, 4.1.2.) Die zuverlässige Erkennung plaquefreier und plaquebedeckter Oberflächen mittels Fluoreszenzmessung kann als gegeben angesehen werden (vgl. 4.1.3).

Die professionelle Zahnreinigung stellte ein adäquates Verfahren zur Herstellung vollständiger Plaquefreiheit als Baseline für die folgende Monitoringphase dar. Die räumliche Nähe von Foto- und Behandlungsraum erlaubte eine zügige Versuchsdurchführung. Das manuelle Vornehmen der unter 3.6.1 beschriebenen jeweils zutreffenden Kameraeinstellungen war unproblematisch und die Aufnahme sowohl direkt als auch indirekt einsehbarer Areale über Fotospiegel leicht durchführbar.

Nach kurzer Übungsphase zeigte sich die Methode als praktisch sehr gut anwendbar. Der standardisierte Versuchsaufbau unter Verwendung einer Kinn-/Stirnstütze und eines Statives (vgl. 3.5.1) ermöglichte das Fotografieren unter bestmöglichem Ausschluss von Fokus-, Bewegungs- und Verwacklungsunschärfe. Die Speicherung der Fotos erfolgte aus unter 5.3.3 beschriebenen Gründen im Rohdatenformat zunächst auf einer SD-Speicherkarte. Der zwingende Netzbetrieb des QLF-D Biluminators ohne Option eines Akkubetriebes stellte im Rahmen des Versuchsaufbaus kein Problem dar, könnte aber die Gebrauchstauglichkeit im klinischen Alltag erschweren.

5.3.3 Datenverarbeitung und Auswertung

Die unter 2.2.2 beschriebenen bisherigen Verfahren zur planimetrischen Flächenbestimmung setzen in der Regel die manuelle Auswahl plaquebedeckter Areale voraus und sehen teilweise von einer Berechnung der Plaquebedeckung einzelner Zahnflächen ab. Ähnlich wie bei der Anwendung klinischer Indizes beruht die Auswertung weitgehend auf persönlicher Zuordnung, weshalb intensive Maßnahmen zur Untersucherkalibrierung notwendig sind. Weiterhin erfordern diese Methoden meist zeitintensive Verfahren zur Weiterverarbeitung und Analyse der erhobenen Bilddaten, welche zur Bewältigung größerer Datenmengen nicht geeignet erscheinen. Ein zentrales Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Entwicklung eines Auswertungsablaufes zur EDV-gestützten planimetrischen Analyse von Fluoreszenz- und konventionellen Fotos nach Anfärben.

Die bestehenden Ansätze aufgreifend wurde für diese Studie mittels der Software ImageJ 1.47q eine planimetrische Analysemethode zur zuverlässigen und effizienten Verarbeitung auch großer Datenmengen erstellt und angewandt. Die initiale Aufnahme der Fotos erfolgte dabei unter Speicherung im Rohdatenformat, da dieses dank Veränderbarkeit der Parameter des Weißabgleiches, der farbmtrischen Visualisierung sowie der Gammakorrektur eine optimale Vorbereitung für eine automatisierte Flächenerkennung zulässt. Weitere Vorteile liegen in deutlich besseren Ergebnissen hinsichtlich Rauschreduktion, Kantenglättung und Schärfung [Fraser, abgerufen am 09.12.2014], was auf Grund des Rauschverhaltens des verwendeten Kameragehäuses (vgl. 5.1.1) besonders von Vorteil ist. Im Anschluss an die Untersuchung wurden die Fotos auf einen Macintosh-Computer übertragen. Die Organisation und Entwicklung der Rohdaten erfolgte mit Adobe Photoshop Lightroom 5.7.1. Diese Software nutzt wie Adobe Photoshop CS6 (Adobe Systems, San José, Kalifornien, USA) Raw Converter 8.4 [Adobe Systems Software Ireland Ltd., abgerufen am 21.12.2014] zur Rohdatenentwicklung. Allerdings ist Adobe Photoshop Lightroom 5.7.1 für die Stapelverarbeitung und den automatisierten Export größerer Datenmengen optimiert.

Die Auswertung der Fotos erfolgte in Graustufen, da sich dabei die Erkennung markierter Areale als bedeutend genauer als die Erkennung bei Auswertung im RGB- und HSI-Farbraum darstellte. Durch die mittels abgestimmter standardisierter Kanalmischung der Farbkanäle bei der Graustufenkonvertierung erreichte Kontrastoptimierung wurde die eindeutige Abgrenzbarkeit plaquebedeckter Oberflächen gegeben. Dabei wurden bei Fluoreszenzfotos die fluoreszierenden Areale (hauptsächlich rot, orangefarben) sowie bei konventionellen Fotos nach Anfärben die angefärbten Areale (rot, lilafarben, magentafarben) verstärkt dargestellt. Ebenfalls wurden andere Farbtöne zur Vermeidung falsch positiver Messfehler durch Verfärbungen, Schmelzanomalien o.ä. weitgehend ausgeblendet und weiterhin durch die Grenzwertfestlegung vor einer fälschlichen Erkennung als Plaque geschützt (vgl. 3.6.1). Es ist jedoch anzumerken, dass Verfärbungen, welche exakt in das Farbspektrum der Autofluoreszenz bzw. des Spektrums der angefärbten Areale (rot, orangefarben, lilafarben, magentafarben) fallen und eine sehr hohe Farbintensität aufweisen sowie vollkommen schwarze Verfärbungen durchaus zu falsch-positiven Messergebnissen führen können. Derartige Verfärbungen der Schmelzoberflächen sind jedoch üblicherweise nicht zu erwarten. Abbildung 23 zeigt beispielhaft die nur minimalen Auswirkungen von Verfärbungen auf den Auswertungsmechanismus.

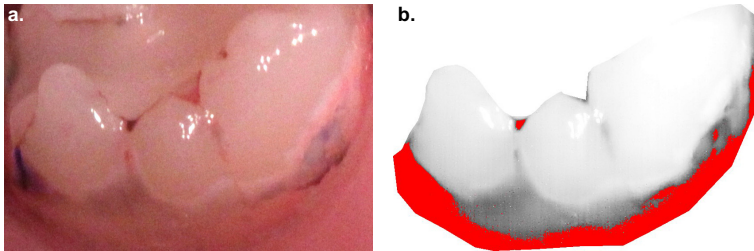


Abbildung 23: Auswirkung von Verfärbungen bei der Auswertung; a.: Ausgangsfoto der Orallfläche von Zahn 36, b.: identifiziertes Areal nach Anwendung der Auswahlmaske

Die Analyse und Auswertung der erstellten Fotos war sowohl bei Fluoreszenzmessung als auch bei konventioneller Messung nach Anfärben einfach und schnell durchführbar. Auch die Verarbeitung größerer Datenmengen konnte durch die strukturierten Arbeitsabläufe effizient und zeitsparend erfolgen.

Durch die große Flexibilität des Analysemakros lässt sich die entwickelte Methode leicht an andere Fragestellungen adaptieren und kann für planimetrische Auswertungen aller Art eingesetzt werden. Daher steht einer Anwendung im Rahmen weiterer Forschungszwecke nichts im Wege.

5.4 Interpretation der Ergebnisse

Die Studie zeigt, dass der Verzicht auf Mundhygiene für 72 Stunden, verglichen mit dem Zustand unter habitueller Mundhygiene, zu höherer Plaquebedeckung in nahezu allen untersuchten Gebieten führte. Es fällt auf, dass bei Orallflächen die Unterschiede zwischen der Plaquebedeckung bei habitueller Mundhygiene und der Plaquebedeckung bei Verzicht auf Mundhygiene geringer als bei Vestibulärflächen waren, wo der Verzicht auf Mundhygiene zu einer deutlichen Zunahme der Plaquebedeckung führte. Dies ist offenbar dem Umstand geschuldet, dass die physiologische Selbstreinigung der Zähne durch Speichel [Klimek, abgerufen am 07.03.2016], Mastikation und Zungenbewegung bei Orallflächen bessere Wirkung als bei Vestibulärflächen zeigt. Studien belegen, dass bei Verzicht auf habituelle Mundhygiene für fünf [Alexander et al., 1969] bzw. 10-21 Tage [Loe et al., 1965] die Plaqueakkumulation bei Orallflächen bedeutend langsamer als bei Vestibulärflächen verläuft. Weiterhin wurde gezeigt, dass im Rahmen der habituellen Mundhygiene zwar bei Vestibulärflächen in der Regel ein suffizientes Reinigungsergebnis erreicht wird, oftmals jedoch Orallflächen insbesondere der Seitenzähne beim Zähneputzen vernachlässigt werden [Rugg-Gunn und

Macgregor, 1978; Winterfeld et al., 2015]. Im Zusammenhang mit den Ergebnissen dieser Studie kann dies zur Annahme führen, dass die physiologischen Selbstreinigungsprozesse an der Gesamtreinigung im Verhältnis zur habituellen Mundhygiene bei Oralflächen eine größere Rolle als bei Vestibulärflächen spielen und bei ersteren zu einer Art Gleichgewicht der Plaquebedeckung führen. Während die größte Bedeckungszunahme bei Vestibulärflächen oberer Molaren auftrat, zeigten Frontzähne insgesamt nur niedrige Bedeckungswerte. Ähnliches wurden auch in einer früheren Studie beobachtet [Quirynen und van Steenberghe, 1989]. Dies könnte durch die mechanische Reinigung mittels Scherkräften beim Abbeißen härterer Nahrungsmittel bedingt sein. Die Mechanismen hierfür sind allerdings äußerst komplex und von vielen Faktoren wie der Zahnform, der Oberflächenrauigkeit und dem Reifegrad der Plaque abhängig, welche die Reinigungswirkung des tangentialen Abgleitens der Nahrung beeinflussen und damit für sehr unterschiedliche Effektivität sorgen [Mierau, 1984]. Genauere Untersuchungen zur Effizienz der physiologischen Selbstreinigung der Zähne und zum Zusammenwirken mit der individuellen habituellen Mundhygiene sind in der Literatur bisher nicht zu finden.

Insgesamt war die mediane Bedeckung bei habitueller Mundhygiene niedrig und lag bei konventioneller Messung nach Anfärben bei 8,7% bzw. bei Messung mittels Fluoreszenzphotografie bei 3,7%. Dabei zeigten die Vestibulärflächen der Oberkieferfrontzähne nur geringe Bedeckung, welche zum ersten Termin bei konventioneller Messung nach Anfärben im Median bei 2,3% lag. Bei Vestibulärflächen von Prämolaren und Molaren lag die mediane Bedeckung zwischen 6,4% und 19,2%, während bei Oralflächen die Mediane für alle Zähne zwischen 6,6% und 17% lagen (konventionelle Messung nach Anfärben beim ersten Termin). Ältere Studien zeigen vergleichbare Ergebnisse [Soder et al., 2003; Theilade et al., 1966]. Der individuelle Mundhygienestatus der Proband(inn)en stellte sich allerdings sehr unterschiedlich dar. So wurden unter habitueller Mundhygiene bei konventioneller Messung nach Anfärben zwischen 0,18% und 72,3% Plaquebedeckung und bei Messung mittels Fluoreszenzphotografie zwischen völliger Plaquefreiheit (0,00%) und 60,2% Plaquebedeckung gemessen. Die Effektivität der habituellen Mundhygiene blieb über den Untersuchungszeitraum stabil, sodass die Plaquebedeckung beim letzten Termin insgesamt nur geringfügig niedriger als beim ersten Termin war. Eine Ausnahme stellten hierbei die Oralflächen des Unterkiefers dar, wo die mediane Bedeckung zu T4 geringer als zu T1 war. Dies könnte auf die Entfernung von vornehmlich in diesem Bereich zu erwartenden mineralisierten Belägen (Zahnstein) im Rahmen der professionellen Zahnreinigung zu T1, mit deren vollständiger Neubildung innerhalb des Studienzeitraumes nicht zu rechnen ist [Hinrichs, 2012], sowie auf einen motivierenden Effekt zur effektiveren Reinigung die-

ser wie beschrieben im Rahmen der habituellen Mundhygiene oftmals vernachlässigten Zahnflächen zurückzuführen sein.

Bei Vestibulärflächen waren die auf Fluoreszenzfotos gemessenen Bedeckungswerte signifikant geringer als die bei konventioneller Messung nach Anfärben ermittelten Werte, während sie bei Oralf Flächen fast das Niveau der Ergebnisse bei konventioneller Messung nach Anfärben erreichten. Nach 48-stündigem Verzicht auf Mundhygiene konnte Plaque mittels Fluoreszenzmessung zwar erkannt werden, doch die Unterschiede zwischen den Messzeitpunkten waren gering und nicht signifikant. Zwischen T1 und T4 zeigten die Ergebnisse der Fluoreszenzmessung bessere Übereinstimmung als die Ergebnisse der konventionellen Messung nach Anfärben.

Die Bland-Altman-Plots zeigen, dass die Übereinstimmung zwischen konventioneller Plaquemessung nach Anfärben und Fluoreszenzmessung mittels QLF-D zu allen Messzeitpunkten systematischen Fehlern sowie insbesondere bei eher hohen Bedeckungswerten einer massiven Streuung unterlag. Bei Fluoreszenzmessung zeigten sich größtenteils geringere Werte als bei konventioneller Messung nach Anfärben. Insgesamt bestand eine geringe bis mittlere Korrelation zwischen den Messmethoden, wobei diese zwischen den einzelnen Proband(inn)en individuell stark schwankte. Dies ist offenbar auf die sich bei beiden Methoden unterscheidenden Mechanismen zur Erkennung der Plaque zurückzuführen. Individuelle sowie auch unbekannte Faktoren wie Ernährungsgewohnheiten, Kariesaktivität, Rauigkeit der Zahnoberfläche, Speichelzusammensetzung und -fließrate etc. beeinflussen die Qualität und Quantität der Plaque und damit die Empfindlichkeit für beide Methoden verschieden und können so zu abweichenden Messergebnissen geführt haben. So wurde für Vestibulärflächen gezeigt, dass die mikrobiologische Zusammensetzung supragingivaler Plaque abhängig von der Zahnposition in der Mundhöhle variiert [Haffajee et al., 2009].

Auffällig ist, dass die systematischen Fehler zu T3 größer als zu T1 und T4 waren. Während Plaque beim Anfärben bereits nach kurzem Reifungsprozess deutlich unter scharfer Abgrenzung plaquefreier Areale sichtbar ist, ist für deutliche Autofluoreszenz offenbar ein längerer Zeitraum erforderlich. Dies könnte damit zusammenhängen, dass bei unreifer Plaque zunächst Streptokokken dominieren und erst nach fünf bis sieben Tagen Actinomyceten, welche durch Porphyrinsynthese eine wichtige Rolle für Fluoreszenzphänomene spielen, in nennenswerter Anzahl angesiedelt sind [Fyrestam et al., 2015; Ritz, 1967]. Ferner schwankte die Intensität der Fluoreszenz und die betroffenen Areale waren im Gegensatz zur Darstellung nach Anfärben oft nur undeutlich, unter stetig abnehmender Intensität zum Rand hin, abgrenzbar. Sicherlich spielten

dabei auch die unter 5.1 beschriebenen Nachteile des Aufnahmesystems eine Rolle und bieten somit Entwicklungspotenzial für deutlichere Sichtbarkeit und damit verbesserte Erkennbarkeit.

Bei weiterer Betrachtung der beim ersten Termin erhobenen Daten zeigte sich, dass bei eher niedriger Plaquebedeckung ($\leq 10\%$ bei konventioneller Messung nach Anfärben) geringere systematische Fehler als bei Betrachtung aller Bedeckungsgrade auftraten und eine bessere Korrelation zwischen den Messmethoden als bei eher hoher Plaquebedeckung ($> 10\%$ bei konventioneller Messung nach Anfärben) bestand. Erwartungsgemäß nimmt bei höherer Plaquebedeckung die Variabilität der Plaquezusammensetzung zu, was zu unterschiedlicher Intensität der Fluoreszenzerscheinungen führen könnte.

Die geringeren Fehler trafen auf Oralflächen des Unterkiefers allerdings nicht zu. Hier traten bei Fluoreszenzmessung teilweise höhere Bedeckungswerte als bei konventioneller Messung nach Anfärben auf. Ursächlich für die stärkere Fluoreszenz in dieser Region könnten lokal auftretende, zu einer Veränderung der Plaquequalität führende Faktoren, wie beispielsweise vermehrter Speichelkontakt, welcher durch Erhöhung des pH-Wertes in der Plaque zu vermehrter Aufnahme von Calcium- und Phosphat-Ionen und damit zu höherer Mineralisation der Plaque führt [Dawes, 2006], sein.

5.5 Schlussfolgerung und Ausblick

Hinsichtlich der Fragestellungen dieser Studie sind aus den vorliegenden Ergebnissen die folgenden Schlüsse zu ziehen:

- (1) Korreliert die auf dem Fluoreszenzfoto quantifizierte Plaquemenge mit der auf dem konventionellen Foto nach Anfärben quantifizierten Plaquemenge, wenn die Aufnahmen **standardisiert mit Stativ und Kinn-/Stirnstütze** angefertigt werden?
- Die Korrelation zwischen der auf standardisierten Fluoreszenzfotos quantifizierten Plaquemenge und der nach Anfärben auf konventionellen Fotos quantifizierten Plaquemenge ist gering.

- (2) Ist das **Monitoring** von Plaquewachstum möglich, wenn die Aufnahmen **standardisiert mit Stativ und Kinn-/Stirnstütze** angefertigt werden?

- Das Monitoring von Plaquewachstum mittels mit Stativ und Kinn-/Stirnstütze angefertigter Fluoreszenzfotos ist nur bedingt möglich.

Offenbar wird messbare Fluoreszenz erst mit zunehmender Plaquereife und -dicke erreicht. Die mittels QLF-D messbare, wie erwartet deutliche Autofluoreszenz von gereifter Plaque wurde auch in weiteren Studien klinisch bestätigt (vgl. 2.3.2), doch fanden hierbei die Eigenschaften von in vivo nach Herstellung völliger Plaquefreiheit neu gewachsener Plaque keine Beachtung. Die vorliegende Studie zeigt, dass die Fluoreszenzmessung mittels QLF-D insbesondere in Bezug auf frische Plaque deutlich unempfindlicher als die konventionelle Messung nach Anfärben ist.

Durch die Untersuchung von sowohl Vestibulär- als auch Oralfächern von Frontzähnen, Prämolaren und Molaren grenzt sich die vorliegende Studie von anderen Arbeiten ab, welche sich auf die Betrachtung von Vestibulärflächen des Frontzahnbereichs beschränken [Han et al., 2015, 2016; van der Veen et al., 2016; Volgenant et al., 2016b], obwohl gerade an diesen Flächen üblicherweise eher wenig Plaque vorzufinden ist [Quirynen und van Steenberghe, 1989]. Zwar sind weiter posterior befindliche Areale des Zahnbogens sowie Oralfächern hinsichtlich der fotografischen Abbildbarkeit schwieriger zugänglich, doch ist es – trotz des erhöhten Aufwands – aufgrund der klinischen Relevanz keinesfalls vertretbar, auf eine Betrachtung dieser zu verzichten. Die unter 5.1.1 beschriebenen Möglichkeiten zur Optimierung des Kamerasystems wären hier besonders von Nutzen, um mit geringem Aufwand sowohl eine Erleichterung der Aufnahme als auch eine Verbesserung der Aufnahmequalität zu erzielen.

Bisherige In-vivo-Studien zeigen starke Assoziation zwischen der Plaquebedeckung auf Fluoreszenzfotos und klinischen Plaqueindizes [van der Veen et al., 2016; Volgenant et al., 2016b]. Allerdings sind klinische Indizes auf Grund ihrer geringeren Differenzierungsstärke für einen adäquaten Vergleich weniger geeignet [Quirynen et al., 1991]. In dieser Studie erlaubte die planimetrische Auswertung der Plaquebedeckung auf Fluoreszenzfotos und auf konventionellen Fotos nach Anfärben hingegen einen hinsichtlich Quantität und Qualität der Bedeckung idealen Vergleich der Methoden. Auch eine weitere Studie kam zum Ergebnis, dass bei planimetrischer Auswertung eine Korrelation zwischen roter Fluoreszenz auf Fluoreszenzfotos und blau gefärbten Arealen auf konventionellen Fotos nach Anfärben besteht [Han et al., 2016]. Allerdings wurde ein anderer Plaquerevelator (2-Tone™; Young Dental, Earth City,

Missouri, USA) als in der vorliegenden Studie verwendet. Weiterhin spricht Blaufärbung für ein fortgeschrittenes Reifestadium der Plaque, welches nach 72-stündigem de-novo-Wachstum nur sehr begrenzt auftrat.

Die in situ nachgewiesene gleichmäßige Verteilung der Fluoreszenz bei der Anzüchtung von Zellkulturen aus Speichel [Kim et al., 2014] unterscheidet sich vom klinischen Bild, bei dem Fluoreszenz vornehmlich im Bereich des überwiegend von Actinomyces besiedelten gingivalen Sulkus nachweisbar ist [Marsh und Nyvad, 2008]. Hinsichtlich der üblicherweise mit Karies assoziierten Spezies wie Laktobazillen, Streptokokken sowie im weiteren Sinne *Candida albicans* kommen bisherige Untersuchungen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Während Koenig et al. isoliert nur bei *Candida albicans*, nicht jedoch bei Laktobazillen und *Streptococcus mutans* Autofluoreszenz feststellen konnten [Koenig et al., 1993], konnte in anderen Untersuchungen *Streptococcus mutans* und weiteren Streptokokken eher grünliche sowie *Candida albicans* und Laktobazillen eher rötliche Fluoreszenz nachgewiesen werden [Coulthwaite et al., 2006; Lennon et al., 2006]. Weiterhin wurde mehrfach gezeigt, dass häufige Saccharosesubstitution sowohl die Kariogenität als auch die rote Autofluoreszenz von Plaque verstärkt [Kim et al., 2014; Lee et al., 2013; Volgenant et al., 2016a], weshalb sich hinsichtlich der Kariogenität fluoreszierender Plaque verschiedene weiter zu verfolgende Fragestellungen, etwa nach der Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Intensität und Lokalisation fluoreszierender Plaque und der Lokalisation von White-Spots [Sadeq et al., 2015] oder kariösen Manifestationen nach Entbänderung bei Personen mit Multi-Bracket-Apparaturen bieten.

Weiterhin zeigen insbesondere die als stark parodontalpathogen eingestuftten Bakterien *Porphyromonas gingivalis* und *Aggregatibacter actinomycetemcomitans* deutliche Autofluoreszenz [Fyrestam et al., 2015] und auch *Prevotella intermedia* ist mit intensiv rot fluoreszierender Plaque assoziiert [Han et al., 2016]. Auch wurde eine Assoziation zwischen fluoreszierender Plaque und gingivaler Blutung, welche als Entzündungszeichen gilt, festgestellt [Volgenant et al., 2016b]. Daher stellt über die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen hinaus die Frage, ob das Vorhandensein fluoreszierender Plaque als Risikomarker für die Entstehung parodontaler Erkrankungen von Nutzen sein kann, einen sehr interessanten Ansatz für weitere Forschung dar. Dabei sollten auch eventuelle Auswirkungen chemischer Plaquehemmer, etwa mittels chlorhexidinhaltiger Spüllösungen, auf die Fluoreszenz der Plaque Beachtung finden.

Trotz der genannten Einschränkungen konnte gezeigt werden, dass die Fluoreszenzmessung mittels QLF-D einen bedeutsamen Ansatz für die noninvasive Identifikation

und Quantifizierung dentaler Plaque darstellt und sowohl für den klinischen Einsatz als auch für weitere Forschungsaktivität viele Möglichkeiten bietet. Gegenstand weiterer klinischer Untersuchungen sollten insbesondere die Zusammenhänge zwischen Intensität der Fluoreszenz und Lokalisation, Reife, Quantität und Pathogenität der Plaque sein. Insbesondere ist dabei die mikrobiologische Zusammensetzung und in Bezug auf die Ergebnisse dieser Studie der Mineralisationsgrad fluoreszierender Plaque von Interesse, wobei auch interindividuelle Unterschiede und deren Auswirkungen untersucht werden sollten.

6 Zusammenfassung

Die Quantifizierung und das Monitoring des Wachstums dentaler Plaque sind zur Prävention plaqueassoziiierter Erkrankungen wie Karies und Parodontopathien, etwa als Hilfsmittel zur Patient(inn)enmotivation oder bei der Anwendung innerhalb klinischer Studien, von großer Bedeutung. Bisweilen erfolgt die Beurteilung meist mittels klinischer Indizes, welche in der Regel ein Anfärben und damit eine Veränderung der Plaque erfordern. Quantitative Light-Induced Fluorescence-Digital (QLF-D) stellt ein planimetrisches Messverfahren dar, welches auf der Autofluoreszenz von Schmelz, Dentin und Porphyrinen, die teilweise von Mikroorganismen in der Plaque synthetisiert werden, basiert.

Ziel der Studie war der Vergleich von auf standardisierten Fluoreszenzfotos quantifizierter Plaque mit auf standardisierten konventionellen Fotos nach Applikation einer Färbelösung quantifizierter Plaque und das Monitoring von Plaquewachstum mittels standardisierter Fluoreszenzfotos über einen Zeitraum von 72 Stunden. Es wurden bei jedem Probanden die Oral- und Vestibulärflächen eines Frontzahnes, eines Prämolaren und eines Molaren pro Kiefer betrachtet. Hierzu wurde ein automatisiertes planimetrisches Auswertungsverfahren zur Ermittlung der prozentualen Plaquebedeckung der jeweiligen Zahnfläche entwickelt und angewandt. Die Studie beinhaltete vier Untersuchungstermine. Beim ersten Termin (T1) wurden ein Fluoreszenz- und nach Anfärben ein konventioneller Fotostatus erstellt und eine professionelle Zahnreinigung durchgeführt. Im Anschluss wurde die habituelle Mundhygiene eingestellt und nach 48 Stunden im Rahmen des zweiten Termins (T2) ein Fluoreszenzfotostatus erstellt. Nach 72 Stunden erfolgte der dritte Termin (T3) analog zu T1 unter anschließender Wiederaufnahme der habituellen Mundhygiene. Der vierte Termin (T4) fand 4–6 Wochen später analog zu T1/T3 statt. Die Proband(inn)engruppe bestand aus 29 (T1-T4) respektive 30 (T1-T3) Studierenden oder Erwerbstätigen im Alter von 20-32 Jahren (Durchschnittsalter $25,8 \pm 2,9$ Jahre).

Es wurde gezeigt, dass 72-stündiger Verzicht auf Mundhygiene zu signifikant höherer Plaquebedeckung führt. Die Korrelation zwischen den bei Fluoreszenzmessung mittels QLF-D und den auf konventionellen Fotos nach Anfärben gemessenen Bedeckungswerten war gering. Insgesamt zeigte sich die Fluoreszenzmessung als für Plaque frühen Reifegrades deutlich unempfindlicher. Offenbar ist eine deutliche Autofluoreszenz erst mit zunehmender Plaquereife und -dicke zu erwarten. Daher ist QLF-D für reine Quantifizierung weniger geeignet; bietet aber Potential zur Beurteilung der Ökologie des Biofilms.

7 Summary

The quantification and monitoring of dental plaque growth as a tool for motivation or within clinical studies is essential for the prevention of plaque-associated diseases such as caries and periodontitis. To date, the evaluation of plaque is generally carried out using clinical indices, which usually require staining and thus alter the plaque. Quantitative Light-Induced Fluorescence-Digital (QLF-D) is a planimetric method measuring the autofluorescence of enamel, dentin, bacterial porphyrines produced by several plaque-associated species, *inter alia*.

The objective of this study was to compare the plaque levels measured with standardized fluorescence images to those measured with standardized conventional images after staining and to monitor the growth of plaque using standardized fluorescence images over a period of 72 hours. The oral and vestibular surfaces of one anterior tooth, one premolar and one molar per jaw of each subject were observed. For this purpose, an automated planimetric procedure to determine the percentage of plaque-covered area of each tooth's surface was developed and used. The study comprised of four visits. On the first visit (T1), fluorescence and conventional images after staining were captured and professional tooth cleaning was performed. After that, the subjects refrained from any oral hygiene procedures. On the second visit after 48 hours (T2), fluorescence images were taken. The third visit after 72 hours (T3) equaled the first visit. After that, oral hygiene was resumed. The fourth visit (T4) took place after 4–6 weeks, equaling T1/T3. 29 (T4) respective 30 (T1-T3) students/gainful persons between 20 and 32 years of age (mean age of $25,8 \pm 2,9$ years) participated in this study.

The study showed that refraining from oral hygiene for 72 hours led to significantly higher plaque levels. The association between the plaque levels measured with QLF-D and the plaque level measured with conventional images after staining was poor. Overall, QLF-D was distinctly less sensible when measuring early plaque. Evidently, distinct autofluorescence can only be expected when examining thick, mature plaque. This makes QLF-D less useful for isolated quantification applications, thus making it a potential method for the evaluation of the ecology of plaque.

8 Literaturverzeichnis

- Aas JA, Paster BJ, Stokes LN, Olsen I, Dewhirst FE: Defining the normal bacterial flora of the oral cavity. *J Clin Microbiol* 2005;43:5721-5732.
- Adobe Systems Software Ireland Ltd.: Camera Raw. <http://helpx.adobe.com/de/photoshop/camera-raw.html>, abgerufen am 21.12.2014.
- Ahrens G: Eine Methode zum quantitativen Vergleich von Zahnbelägen – Möglichkeiten und Fehlerbreite. *Dtsch Zahnärztl Z* 1973;28:281-284.
- Alexander AG, Morganstein SI, Ribbons JW: A study of the growth of plaque and the efficiency of self-cleansing mechanisms. *Dent Pract Dent Rec* 1969;19:293-297.
- Angmar-Mansson B, ten Bosch JJ: Quantitative Light-Induced Fluorescence (QLF): a method for assessment of incipient caries lesions. *Dentomaxillofac Radiol* 2001;30:298-307.
- Baab DA, Broadwell AH, Williams BL: A comparison of antimicrobial activity of four disclosant dyes. *J Dent Res* 1983;62:837-841.
- Begue WJ, Bard RC, Koehne GW: Microbial inhibition by erythrosin. *J Dent Res* 1966;45:1464-1467.
- Bittar DG, Pontes LR, Calvo AF, Novaes TF, Braga MM, Freitas PM, Tabchoury CP, Mendes FM: Is the red fluorescence of dental plaque related to its cariogenicity? *J Biomed Opt* 2014;19:065004.
- Bland JM, Altman DG: Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *Lancet* 1986;1:307-310.
- Block PL, Lobene RR, Derdivanis JP: A two-tone dye test for dental plaque. *J Periodontol* 1972;43:423-426.
- Block RP, Bouwsma OJ, Howard-Nordan KS, Miller JM, Poore CL, Sunberg RJ: Validation of computerized photo-image analysis (PIA) measurement of plaque. *J Dent Res* 1996;75:367.
- Caldwell RC, Hunt DE: A comparison of the antimicrobial activity of disclosing agents. *J Dent Res* 1969;48:913-915.
- Carter K, Landini G, Walmsley AD: Automated quantification of dental plaque accumulation using digital imaging. *J Dent* 2004;32:623-628.
- Claydon N, Addy M: The use of planimetry to record and score the modified Navy index and other area-based plaque indices. A comparative toothbrush study. *J Clin Periodontol* 1995;22:670-673.

- Claydon N, Yates R, Labello R, Hall C, Armstrong R, Addy M: A methodology using subjective and objective measures to compare plaque inhibition by toothpastes. *J Clin Periodontol* 2004;31:1106-1109.
- Coulthwaite L, Pretty IA, Smith PW, Higham SM, Verran J: The microbiological origin of fluorescence observed in plaque on dentures during QLF analysis. *Caries Res* 2006;40:112-116.
- Dawes C: Why does supragingival calculus form preferentially on the lingual surface of the 6 lower anterior teeth? *J Can Dent Assoc* 2006;72:923-926.
- Dawes C, Jenkins GN, Tonge CH: The nomenclature of the integuments of the enamel surface of teeth. *Br Dent J* 1963;115:65-68.
- de Josselin de Jong E, Sundstrom F, Westerling H, Tranaeus S, ten Bosch JJ, Angmar-Mansson B: A new method for in vivo quantification of changes in initial enamel caries with laser fluorescence. *Caries Res* 1995;29:2-7.
- Fejerskov O, Kidd EAM, Nyvad B: Pathology of dental caries; in Fejerskov O, Kidd EAM (Hrsg.): *Dental caries: the disease and its clinical management*. Oxford, Vereinigtes Königreich, Blackwell Munksgaard, 2008, S. 19-48.
- Fejerskov O, Manji F: Reactor paper: risk assessment in dental caries; in Bader JD (Hrsg.): *Risk assessment in dentistry*. Chapel Hill, North Carolina, USA, University of North Carolina Dental Ecology, 1990, S. 215-217.
- Fiorellini JP, Kim DM, Uzel NG: Gingival inflammation; in Carranza FA, Newman MG, Takei HH, Klokkevold PR (Hrsg.): *Carranza's clinical periodontology*. St. Louis, Missouri, USA, Saunders Elsevier, 2012, S. 71-75.
- Fischman SL: Current status of indices of plaque. *J Clin Periodontol* 1986;13:371-374, 379-380.
- Frandsen A: Mechanical oral hygiene practices; in Loe H, Kleinman D (Hrsg.): *Dental plaque control measures and oral hygiene practices*. Oxford, Vereinigtes Königreich, IRL Press Limited, 1986, S. 93-119.
- Fraser B: Understanding Digital Raw Capture. http://www.images.adobe.com/content/dam/Adobe/en/products/photoshop/pdfs/understanding_digitalrawcapture.pdf, abgerufen am 09.12.2014.
- Fyrestam J, Bjurshammar N, Paulsson E, Johannsen A, Ostman C: Determination of porphyrins in oral bacteria by liquid chromatography electrospray ionization tandem mass spectrometry. *Anal Bioanal Chem* 2015;407:7013-7023.
- Gallagher IH, Fussell SJ, Cutress TW: Mechanism of action of a two-tone plaque disclosing agent. *J Periodontol* 1977;48:395-396.
- Gibbons RJ: Bacterial adhesion to oral tissues: a model for infectious diseases. *J Dent Res* 1989;68:750-760.

- Greene JC, Vermillion JR: The simplified oral hygiene index. *J Am Dent Assoc* 1964;68:7-13.
- Haffajee AD, Teles RP, Patel MR, Song X, Yaskell T, Socransky SS: Factors affecting human supragingival biofilm composition. II. Tooth position. *J Periodontal Res* 2009;44:520-528.
- Hager & Werken GmbH & Co. KG: Mira-2-Ton®. <http://www.hagerwerken.de/dentalprodukte/n19374/Mira2Ton/>, abgerufen am 19.01.2015.
- Han SY, Kim BR, Ko HY, Kwon HK, Kim BI: Validity and reliability of autofluorescence-based quantification method of dental plaque. *Photodiagnosis Photodyn Ther* 2015;12:587-591.
- Han SY, Kim BR, Ko HY, Kwon HK, Kim BI: Assessing the use of Quantitative Light-Induced Fluorescence-Digital as a clinical plaque assessment. *Photodiagnosis Photodyn Ther* 2016;13:34-39.
- Heinrich-Weltzien R, Kuhnisch J, van der Veen M, de Josselin de Jong E, Stosser L: Quantitative Light-Induced Fluorescence (QLF) – a potential method for the dental practitioner. *Quintessence Int* 2003;34:181-188.
- Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. Köln, Deutschland, Deutscher Ärzte-Verlag, 2013.
- Hinrichs JE: The role of dental calculus and other local predisposing factors; in Carranza FA, Newman MG, Takei HH, Klokkevold PR (Hrsg.): Carranza's clinical periodontology. St. Louis, Missouri, USA, Saunders Elsevier, 2012, S. 217-231.
- Hinrichs JE, Novak MJ: Classification of diseases and conditions affecting the periodontium; in Carranza FA, Newman MG, Takei HH, Klokkevold PR (Hrsg.): Carranza's clinical periodontology. St. Louis, Missouri, USA, Saunders Elsevier, 2012, S. 34-54.
- Hope CK, de Josselin de Jong E, Field MR, Valappil SP, Higham SM: Photobleaching of red fluorescence in oral biofilms. *J Periodontal Res* 2011;46:228-234.
- Jain AK: Fundamentals of digital image processing. Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Prentice Hall, 1989.
- Kim YS, Lee ES, Kwon HK, Kim BI: Monitoring the maturation process of a dental microcosm biofilm using the Quantitative Light-Induced Fluorescence-Digital (QLF-D). *J Dent* 2014;42:691-696.
- Klimek J: Speichel & Mundgesundheit. http://www.zahnerhaltung.ukw.de/fileadmin/uk/zahnerhaltung/Dokumente/StuDent_Skript.pdf, abgerufen am 07.03.2016.
- Koenig K, Flemming G, Hibst R: Laser-induced autofluorescence spectroscopy of dental caries. *Cell Mol Biol* 1998;44:1293-1300.

- Koenig K, Hibst R, Meyer H, Flemming G, Schneckenburger H: Laser-induced autofluorescence of carious regions of human teeth and caries-involved bacteria; in: SPIE. 1993, vol 2080, pp 170-180.
- Kolenbrander PE: Oral microbial communities: biofilms, interactions, and genetic systems. *Annu Rev Microbiol* 2000;54:413-437.
- Lange DE, Plagmann HC, Eenboom A, Promesberger A: Klinische Bewertungsverfahren zur Objektivierung der Mundhygiene. *Dtsch Zahnärztl Z* 1977;32:44-47.
- Lee ES, Kang SM, Ko HY, Kwon HK, Kim BI: Association between the cariogenicity of a dental microcosm biofilm and its red fluorescence detected by Quantitative Light-Induced Fluorescence-Digital (QLF-D). *J Dent* 2013;41:1264-1270.
- Lennon AM, Buchalla W, Brune L, Zimmermann O, Gross U, Attin T: The ability of selected oral microorganisms to emit red fluorescence. *Caries Res* 2006;40:2-5.
- Li Y, Caufield PW: The fidelity of initial acquisition of mutans streptococci by infants from their mothers. *J Dent Res* 1995;74:681-685.
- Lindhe J, Hamp S, Loe H: Experimental periodontitis in the beagle dog. *J Periodontal Res* 1973;8:1-10.
- Lindhe J, Hamp SE, Loe H: Plaque induced periodontal disease in beagle dogs. A 4-year clinical, roentgenographical and histometrical study. *J Periodontal Res* 1975;10:243-255.
- Loe H, Anerud A, Boysen H, Morrison E: Natural history of periodontal disease in man. Rapid, moderate and no loss of attachment in Sri Lankan laborers 14 to 46 years of age. *J Clin Periodontol* 1986;13:431-445.
- Loe H, Theilade E, Jensen SB: Experimental gingivitis in man. *J Periodontol* 1965;36:177-187.
- Loesche WJ: Role of streptococcus mutans in human dental decay. *Microbiol Rev* 1986;50:353-380.
- Ludbrook J: Statistical techniques for comparing measurers and methods of measurement: a critical review. *Clin Exp Pharmacol Physiol* 2002;29:527-536.
- Mander CI, Mainwaring PJ: Assessment of the validity of two plaque indices. *Community Dent Oral Epidemiol* 1980;8:139-141.
- Marsh P, Martin MV: *Orale Mikrobiologie*. Stuttgart, Deutschland, Thieme, 2003.
- Marsh PD: Microbial ecology of dental plaque and its significance in health and disease. *Adv Dent Res* 1994;8:263-271.
- Marsh PD, Nyvad B: The oral microflora and biofilms on teeth; in Fejerskov O, Kidd EAM (Hrsg.): *Dental caries: the disease and its clinical management*. Oxford, Vereinigtes Königreich, Blackwell Munksgaard, 2008, S. 163-188.

- Marthaler TM: Changes in the prevalence of dental caries: how much can be attributed to changes in diet? *Caries Res* 1990;24 Suppl 1:3-15; discussion 16-25.
- McCracken GI, Preshaw PM, Steen IN, Swan M, deJager M, Heasman PA: Measuring plaque in clinical trials: index or weight? *J Clin Periodontol* 2006;33:172-176.
- Mierau HD: Beziehungen zwischen Plaquebildung, Rauigkeit der Zahnoberfläche und Selbstreinigung. *Dtsch Zahnarztl Z* 1984;39:691-698.
- Mohan N, Mahesh MR, Varghese VI, Pretty IA, Taylor AM, Ellwood RP: Evaluation of the sensitivity of a digital plaque imaging system on different tooth surfaces. *J Clin Dent* 2012;23:11-16.
- Nikon Corp.: ISO Sensitivity. <http://imaging.nikon.com/lineup/dslr/basics/13/index.htm>, abgerufen am 28.05.2018.
- Nyvad B, Kilian M: Microbiology of the early colonization of human enamel and root surfaces in vivo. *Scand J Dent Res* 1987;95:369-380.
- Nyvad B, Kilian M: Comparison of the initial streptococcal microflora on dental enamel in caries-active and in caries-inactive individuals. *Caries Res* 1990;24:267-272.
- Pretty IA, Edgar WM, Smith PW, Higham SM: Quantification of dental plaque in the research environment. *J Dent* 2005;33:193-207.
- Quirynen M, Dekeyser C, van Steenberghe D: Discriminating power of five plaque indices. *J Periodontol* 1991;62:100-105.
- Quirynen M, van Steenberghe D: Is early plaque growth rate constant with time? *J Clin Periodontol* 1989;16:278-283.
- Quirynen M, van Steenberghe D, Vuylsteke M: The possibility of measuring plaque growth in vivo within 24 hours. *J Periodontal Res* 1985;20:321-328.
- Rateitschak-Pluss EM, Guggenheim B: Effects of a carbohydrate-free diet and sugar substitutes on dental plaque accumulation. *J Clin Periodontol* 1982;9:239-251.
- Rekola M, Scheinin A: Quantification of dental plaque through planimetric analysis. *Scand J Dent Res* 1977;85:51-55.
- Ritz HL: Microbial population shifts in developing human dental plaque. *Arch Oral Biol* 1967;12:1561-1568.
- Rugg-Gunn AJ, Macgregor ID: A survey of toothbrushing behaviour in children and young adults. *J Periodontal Res* 1978;13:382-389.
- Sadeq A, Risk JM, Pender N, Higham SM, Valappil SP: Evaluation of the co-existence of the red fluorescent plaque bacteria *P. gingivalis* with *S. gordonii* and *S. mutans* in white spot lesion formation during orthodontic treatment. *Photodiagnosis Photodyn Ther* 2015;12:232-237.
- Sagel PA, Lapujade PG, Miller JM, Sunberg RJ: Objective quantification of plaque using digital image analysis. *Monogr Oral Sci* 2000;17:130-143.

- Silness J, Loe H: Periodontal disease in pregnancy II. Correlation between oral hygiene and periodontal condition. *Acta Odontol Scand* 1964;22:121-135.
- Smith RN, Brook AH, Elcock C: The quantification of dental plaque using an image analysis system: reliability and validation. *J Clin Periodontol* 2001;28:1158-1162.
- Soder B, Johannsen A, Lagerlof F: Percent of plaque on individual tooth surfaces and differences in plaque area between adjacent teeth in healthy adults. *Int J Dent Hyg* 2003;1:23-28.
- Soder PO, Jin LJ, Soder B: Computerized planimetric method for clinical plaque measurement. *Scand J Dent Res* 1993;101:21-25.
- Staudt CB, Kinzel S, Hassfeld S, Stein W, Staehle HJ, Dorfer CE: Computer-based intraoral image analysis of the clinical plaque removing capacity of 3 manual toothbrushes. *J Clin Periodontol* 2001;28:746-752.
- Stummer W, Pichlmeier U, Meinel T, Wiestler OD, Zanella F, Reulen HJ: Fluorescence-guided surgery with 5-aminolevulinic acid for resection of malignant glioma: a randomised controlled multicentre phase III trial. *Lancet Oncol* 2006;7:392-401.
- Syed SA, Loesche WJ: Bacteriology of human experimental gingivitis: effect of plaque age. *Infect Immun* 1978;21:821-829.
- Teughels W, Quirynen M, Jakubovics N: Periodontal microbiology; in Carranza FA, Newman MG, Takei HH, Klokkevold PR (Hrsg.): Carranza's clinical periodontology. St. Louis, Missouri, USA, Saunders Elsevier, 2012, S. 232-270.
- Theilade E, Wright WH, Jensen SB, Loe H: Experimental gingivitis in man. II. A longitudinal clinical and bacteriological investigation. *J Periodontal Res* 1966;1:1-13.
- Turesky S, Gilmore ND, Glickman I: Reduced plaque formation by the chloromethyl analogue of vitamin C. *J Periodontol* 1970;41:41-43.
- Valentine RM, Ibbotson SH, Wood K, Brown CT, Moseley H: Modelling fluorescence in clinical photodynamic therapy. *Photochem Photobiol Sci* 2013;12:203-213.
- van der Veen MH, de Josselin de Jong E: Application of Quantitative Light-Induced Fluorescence for assessing early caries lesions. *Monogr Oral Sci* 2000;17:144-162.
- van der Veen MH, Thomas RZ, Huysmans MC, de Soet JJ: Red autofluorescence of dental plaque bacteria. *Caries Res* 2006;40:542-545.
- van der Veen MH, Volgenant CM, Keijser B, Ten Cate JB, Crielaard W: Dynamics of red fluorescent dental plaque during experimental gingivitis-A cohort study. *J Dent* 2016.
- van Houte J: Role of micro-organisms in caries etiology. *J Dent Res* 1994;73:672-681.

- Verran J, Roccliffe MD: Feasibility of using automatic image analysis for measuring dental plaque in situ. *J Dent* 1986;14:11-13.
- Volgenant CM, Hoogenkamp MA, Buijs MJ, Zaura E, Ten Cate JM, van der Veen MH: Red fluorescent biofilm: the thick, the old, and the cariogenic. *J Oral Microbiol* 2016a;8:30346.
- Volgenant CM, Mostajo MF, Rosema NA, van der Weijden FA, Ten Cate JM, van der Veen MH: Comparison of red autofluorescing plaque and disclosed plaque-a cross-sectional study. *Clin Oral Investig* 2016b.
- Volgenant CM, van der Veen MH, de Soet JJ, ten Cate JM: Effect of metalloporphyrins on red autofluorescence from oral bacteria. *Eur J Oral Sci* 2013;121:156-161.
- Volgenant CM, van der Veen MH, Hoogenkamp MA, ten Cate JM: Biofilm age and thickness determines the amount of red fluorescence. *Caries Res* 2012;46:279.
- Winterfeld T, Schlueter N, Harnacke D, Illig J, Margraf-Stiksrud J, Deinzer R, Ganss C: Toothbrushing and flossing behaviour in young adults – a video observation. *Clin Oral Investig* 2015;19:851-858.
- Wright GZ, Feasby WH, Banting DB: The effectiveness of interdental flossing with and without fluoride dentifrice. *Pediatr Dent* 1980;2:105-109.
- Zee K, Rundegren J, Attstrom R: Effect of delmopinol hydrochloride mouthrinse on plaque formation and gingivitis in "rapid" and "slow" plaque formers. *J Clin Periodontol* 1997;24:486-491.

9 Anhang

9.1 Tabellarische Gesamtübersicht

Tabelle 13 zeigt die Einzelwerte der Plaquemessungen bei konventioneller Messung nach Anfärben und bei Fluoreszenzmessung zu den einzelnen Terminen.

Tabelle 13: Plaquebedeckung in Einzelwerten (%); konv.: konventionelle Messung nach Anfärben; QLF-D: Fluoreszenzmessung; Tne: Termin nicht eingehalten

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
01	Oberkiefer	Frontzahn	oral	4,4	2,9	2,4	1,3	1,7	1,6	0,63
01	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,3	0,69	1,2	0,01	0,13	0,18	0,00
01	Oberkiefer	Prämolar	oral	6,7	4,9	3,3	4,7	1,6	2,8	2,9
01	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	20,6	25,2	7,2	2,9	4,5	7,0	1,9
01	Oberkiefer	Molar	oral	2,9	3,6	2,3	7,6	1,7	2,1	1,7
01	Oberkiefer	Molar	vestibulär	24,7	33,3	9,9	3,4	11,3	11,2	3,9
01	Unterkiefer	Frontzahn	oral	23,7	30,3	3,7	9,0	9,7	12,5	7,9
01	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,7	4,1	0,64	0,11	0,32	0,05	0,18
01	Unterkiefer	Prämolar	oral	7,2	10,0	0,83	4,8	3,6	1,7	0,68
01	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	18,3	20,0	9,7	2,4	4,7	3,2	2,4
01	Unterkiefer	Molar	oral	5,6	11,9	0,55	1,5	1,6	1,9	0,81
01	Unterkiefer	Molar	vestibulär	19,0	26,9	9,6	4,8	7,9	5,5	7,4
02	Oberkiefer	Frontzahn	oral	5,9	7,4	45,4	0,93	1,4	2,6	0,63
02	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,5	14,2	2,4	0,13	0,23	1,5	0,11
02	Oberkiefer	Prämolar	oral	10,7	10,8	14,6	4,6	1,9	1,6	4,6
02	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	9,1	46,4	19,4	2,4	3,9	3,8	2,3
02	Oberkiefer	Molar	oral	11,9	9,9	13,0	5,7	2,8	3,6	4,4
02	Oberkiefer	Molar	vestibulär	14,6	71,7	42,1	16,5	10,1	17,7	23,1
02	Unterkiefer	Frontzahn	oral	14,4	10,4	6,0	11,1	2,7	3,5	3,9
02	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	4,3	8,0	0,99	0,23	0,55	0,26	0,33
02	Unterkiefer	Prämolar	oral	34,9	9,5	10,4	14,6	11,6	10,7	14,3
02	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	7,1	10,4	3,8	1,9	0,89	0,66	2,5
02	Unterkiefer	Molar	oral	25,6	4,9	6,9	18,4	13,4	14,8	20,3
02	Unterkiefer	Molar	vestibulär	10,7	22,6	6,9	6,6	3,4	3,5	10,5
03	Oberkiefer	Frontzahn	oral	0,28	6,0	6,4	1,1	2,9	3,4	1,6
03	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,36	4,4	1,5	0,04	0,93	0,11	0,06
03	Oberkiefer	Prämolar	oral	8,7	8,3	6,4	1,8	1,3	5,7	1,7
03	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	5,6	27,4	5,8	2,2	3,7	4,0	1,3

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
03	Oberkiefer	Molar	oral	7,2	8,0	8,9	3,1	4,1	5,8	1,1
03	Oberkiefer	Molar	vestibulär	6,3	53,4	2,9	4,1	3,7	12,8	2,7
03	Unterkiefer	Frontzahn	oral	4,3	12,2	4,1	0,47	0,63	1,4	0,02
03	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,2	10,5	2,1	0,09	0,19	0,48	0,02
03	Unterkiefer	Prämolar	oral	19,7	22,6	3,1	6,1	12,4	16,8	5,3
03	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	5,2	3,5	5,3	3,4	2,3	3,9	2,0
03	Unterkiefer	Molar	oral	9,7	12,9	4,0	7,7	8,4	10,1	0,89
03	Unterkiefer	Molar	vestibulär	6,8	13,2	7,9	5,3	4,7	9,5	3,1
04	Oberkiefer	Frontzahn	oral	12,6	17,0	16,8	3,3	4,3	5,6	2,5
04	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,29	5,3	1,0	0,05	0,82	0,33	0,19
04	Oberkiefer	Prämolar	oral	10,5	9,9	19,0	7,9	6,4	8,9	5,9
04	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	5,5	11,2	3,0	3,1	5,5	8,7	2,4
04	Oberkiefer	Molar	oral	7,5	8,6	12,7	5,4	4,0	5,0	3,6
04	Oberkiefer	Molar	vestibulär	8,7	30,3	7,0	4,9	5,7	7,8	5,4
04	Unterkiefer	Frontzahn	oral	17,7	14,4	13,7	6,2	4,1	7,5	2,9
04	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,27	5,6	0,77	0,01	0,20	0,13	0,06
04	Unterkiefer	Prämolar	oral	26,2	9,9	31,0	14,4	14,1	20,5	9,3
04	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	4,5	6,0	2,8	2,2	6,7	6,2	2,3
04	Unterkiefer	Molar	oral	17,8	4,7	25,1	9,2	8,9	12,8	5,3
04	Unterkiefer	Molar	vestibulär	8,9	13,6	6,8	4,3	9,8	9,5	5,2
05	Oberkiefer	Frontzahn	oral	1,8	58,5	9,9	2,0	2,5	2,1	1,1
05	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	11,6	25,2	4,9	0,49	0,98	1,1	1,1
05	Oberkiefer	Prämolar	oral	11,2	18,2	13,3	2,1	5,8	5,6	2,3
05	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	17,8	26,5	31,0	7,6	8,7	7,4	5,2
05	Oberkiefer	Molar	oral	14,0	17,2	12,6	2,0	4,3	5,4	4,0
05	Oberkiefer	Molar	vestibulär	14,8	40,1	36,3	11,0	13,7	16,3	7,9
05	Unterkiefer	Frontzahn	oral	55,7	24,1	4,2	1,7	2,7	11,4	0,90
05	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	17,6	10,6	6,0	0,03	0,09	0,24	0,13
05	Unterkiefer	Prämolar	oral	33,4	14,8	16,0	7,1	8,8	7,3	8,3
05	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	13,7	5,4	15,8	6,1	4,0	7,5	5,1
05	Unterkiefer	Molar	oral	29,2	16,4	16,5	16,0	10,7	10,3	10,6
05	Unterkiefer	Molar	vestibulär	11,8	11,9	20,7	10,4	12,4	12,2	9,5
06	Oberkiefer	Frontzahn	oral	2,2	11,3	3,4	4,9	6,7	1,8	2,6
06	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,8	9,6	12,1	2,8	5,6	4,2	0,13
06	Oberkiefer	Prämolar	oral	4,8	9,7	6,9	1,8	1,8	1,9	1,2
06	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	12,0	55,5	15,1	3,5	13,1	8,0	7,7
06	Oberkiefer	Molar	oral	3,5	6,2	4,0	1,6	1,5	0,83	0,71
06	Oberkiefer	Molar	vestibulär	10,8	45,3	28,2	13,2	21,7	13,3	17,5

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
06	Unterkiefer	Frontzahn	oral	19,6	12,5	19,2	12,7	6,8	6,8	5,2
06	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	6,3	13,6	5,5	1,7	7,8	3,4	0,56
06	Unterkiefer	Prämolar	oral	36,2	35,7	26,6	39,1	42,1	34,2	26,9
06	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	13,4	16,4	7,7	0,40	8,9	1,7	4,2
06	Unterkiefer	Molar	oral	29,3	20,1	24,1	20,0	21,3	15,0	11,9
06	Unterkiefer	Molar	vestibulär	19,0	18,3	15,1	2,7	6,2	2,5	6,0
07	Oberkiefer	Frontzahn	oral	4,4	8,2	0,33	0,53	1,1	1,1	0,95
07	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	5,8	5,4	0,97	0,00	0,01	0,02	0,01
07	Oberkiefer	Prämolar	oral	9,6	8,4	4,8	1,4	5,2	2,7	2,5
07	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	44,7	47,9	25,3	3,8	6,0	6,0	1,3
07	Oberkiefer	Molar	oral	4,6	7,3	4,2	1,4	5,4	3,2	1,7
07	Oberkiefer	Molar	vestibulär	22,7	56,9	13,1	4,5	5,9	5,9	2,0
07	Unterkiefer	Frontzahn	oral	5,7	10,5	0,62	0,05	0,55	1,1	0,29
07	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	10,4	26,2	21,0	0,03	0,00	0,02	0,00
07	Unterkiefer	Prämolar	oral	11,8	26,3	1,7	2,5	9,1	10,6	0,88
07	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	10,1	18,0	7,4	1,5	4,6	3,7	0,76
07	Unterkiefer	Molar	oral	13,5	15,1	7,8	4,1	5,8	4,5	1,7
07	Unterkiefer	Molar	vestibulär	10,1	13,4	6,3	2,5	3,4	1,1	1,4
08	Oberkiefer	Frontzahn	oral	10,5	4,3	4,7	3,2	3,6	5,2	2,7
08	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	4,4	11,6	1,1	0,02	0,05	0,23	0,06
08	Oberkiefer	Prämolar	oral	18,8	8,6	18,7	23,3	21,8	25,8	19,1
08	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	34,7	42,7	12,2	8,3	10,5	15,3	7,5
08	Oberkiefer	Molar	oral	10,9	4,7	10,0	3,4	3,0	3,1	1,7
08	Oberkiefer	Molar	vestibulär	41,6	50,1	21,2	7,0	9,5	12,2	6,4
08	Unterkiefer	Frontzahn	oral	29,4	23,3	7,3	15,5	2,7	4,7	15,4
08	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	7,9	17,9	4,3	4,3	0,81	3,2	1,9
08	Unterkiefer	Prämolar	oral	4,0	8,0	8,5	23,7	24,3	31,2	19,4
08	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	20,5	23,5	3,1	3,5	7,5	9,4	3,5
08	Unterkiefer	Molar	oral	31,3	18,8	21,7	31,2	14,4	17,5	13,7
08	Unterkiefer	Molar	vestibulär	28,0	26,8	10,8	4,2	7,5	11,4	3,6
09	Oberkiefer	Frontzahn	oral	0,89	6,0	0,42	2,1	1,4	2,7	1,6
09	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	6,1	43,8	4,4	1,7	1,3	1,9	0,57
09	Oberkiefer	Prämolar	oral	6,9	7,8	3,6	8,5	5,1	5,9	5,6
09	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	37,3	29,0	17,5	14,8	4,9	6,8	8,0
09	Oberkiefer	Molar	oral	5,6	7,9	4,8	6,0	5,6	5,0	4,8
09	Oberkiefer	Molar	vestibulär	19,1	22,8	7,0	18,7	9,3	12,6	12,8
09	Unterkiefer	Frontzahn	oral	30,5	12,1	1,6	2,6	0,73	1,7	1,7
09	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	58,2	14,2	9,5	19,8	10,5	24,1	8,1

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
09	Unterkiefer	Prämolar	oral	23,0	5,2	2,5	11,0	10,6	7,4	7,4
09	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	24,1	9,2	19,3	8,0	5,2	4,3	3,5
09	Unterkiefer	Molar	oral	18,6	5,3	5,2	17,8	15,5	15,7	21,1
09	Unterkiefer	Molar	vestibulär	19,4	14,8	18,2	12,1	6,4	6,8	3,5
10	Oberkiefer	Frontzahn	oral	26,4	11,3	7,1	16,5	8,5	10,3	12,5
10	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	5,8	5,0	5,5	1,1	0,00	0,54	0,41
10	Oberkiefer	Prämolar	oral	14,6	15,9	7,1	9,4	11,0	8,6	9,6
10	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	47,7	67,9	12,6	6,8	7,5	9,8	5,1
10	Oberkiefer	Molar	oral	10,9	11,3	4,5	7,5	8,9	8,8	7,7
10	Oberkiefer	Molar	vestibulär	63,2	51,9	10,0	9,8	7,8	11,0	8,9
10	Unterkiefer	Frontzahn	oral	56,3	23,5	23,2	44,2	5,2	5,4	8,3
10	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	14,4	11,2	24,2	0,58	0,02	2,6	1,2
10	Unterkiefer	Prämolar	oral	6,1	23,2	12,3	26,1	22,5	30,8	22,8
10	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	17,2	20,1	10,0	7,2	5,5	6,9	5,1
10	Unterkiefer	Molar	oral	13,5	15,3	13,2	17,5	15,7	18,4	16,5
10	Unterkiefer	Molar	vestibulär	23,7	26,5	15,7	7,5	6,2	9,4	7,5
11	Oberkiefer	Frontzahn	oral	1,6	9,6	1,7	2,1	4,1	3,8	3,6
11	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,6	23,6	4,6	0,06	0,01	0,04	0,20
11	Oberkiefer	Prämolar	oral	4,6	10,9	5,3	4,2	5,3	5,1	2,6
11	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	10,7	36,9	21,2	1,4	7,3	3,2	3,7
11	Oberkiefer	Molar	oral	7,5	8,8	7,0	8,4	9,1	6,6	3,5
11	Oberkiefer	Molar	vestibulär	19,3	50,8	22,4	1,9	16,4	4,7	2,7
11	Unterkiefer	Frontzahn	oral	8,7	3,7	2,9	8,9	2,0	2,0	5,0
11	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	4,5	21,0	7,2	0,88	0,10	0,22	0,31
11	Unterkiefer	Prämolar	oral	11,6	3,7	6,6	8,9	8,8	6,3	4,3
11	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	3,9	14,8	11,4	0,88	3,2	1,3	1,6
11	Unterkiefer	Molar	oral	7,3	3,1	10,1	7,5	12,1	8,2	5,6
11	Unterkiefer	Molar	vestibulär	10,2	26,9	14,9	5,5	8,5	4,0	3,9
12	Oberkiefer	Frontzahn	oral	29,7	30,1	11,2	16,6	8,6	28,7	21,8
12	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,1	8,1	0,69	0,05	0,04	0,30	0,07
12	Oberkiefer	Prämolar	oral	14,5	14,0	15,0	8,0	3,8	3,2	3,8
12	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	3,1	22,1	2,3	1,5	2,1	3,2	1,0
12	Oberkiefer	Molar	oral	14,0	13,5	15,3	8,0	3,6	5,0	4,7
12	Oberkiefer	Molar	vestibulär	5,6	50,4	5,2	3,7	1,8	2,4	1,7
12	Unterkiefer	Frontzahn	oral	48,7	15,2	8,8	27,3	9,4	9,9	15,3
12	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,7	11,0	1,7	0,62	0,69	0,79	0,56
12	Unterkiefer	Prämolar	oral	23,6	15,8	4,8	11,1	7,3	3,9	4,3
12	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	2,2	7,5	1,1	1,5	1,5	0,26	0,45

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
12	Unterkiefer	Molar	oral	19,6	17,3	9,8	12,3	12,9	8,3	8,0
12	Unterkiefer	Molar	vestibulär	3,2	13,6	2,7	3,2	3,4	1,9	2,4
13	Oberkiefer	Frontzahn	oral	40,9	7,0	16,5	6,2	4,9	3,9	11,1
13	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,88	5,2	0,87	0,00	0,00	0,04	0,02
13	Oberkiefer	Prämolar	oral	14,1	14,9	25,0	18,3	16,0	14,5	17,6
13	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	8,8	36,6	4,5	2,3	3,6	5,3	1,1
13	Oberkiefer	Molar	oral	14,9	18,3	21,3	27,4	26,1	30,5	44,2
13	Oberkiefer	Molar	vestibulär	23,9	35,5	8,4	7,0	5,9	10,6	4,7
13	Unterkiefer	Frontzahn	oral	22,4	26,9	13,5	7,2	5,1	10,7	8,7
13	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	3,9	9,4	5,6	0,58	0,60	0,48	0,34
13	Unterkiefer	Prämolar	oral	3,4	23,1	22,2	10,4	8,6	9,5	7,5
13	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	0,89	6,6	3,0	0,95	1,2	0,59	0,24
13	Unterkiefer	Molar	oral	17,3	16,6	29,9	41,6	42,2	44,3	48,1
13	Unterkiefer	Molar	vestibulär	7,7	14,9	8,1	4,6	8,1	9,7	5,4
14	Oberkiefer	Frontzahn	oral	4,0	8,2	7,9	0,81	0,88	1,5	0,88
14	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	5,9	9,9	7,2	1,4	2,4	6,6	0,39
14	Oberkiefer	Prämolar	oral	2,7	10,0	7,3	3,8	5,2	7,3	3,9
14	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	16,4	63,6	14,9	7,5	15,3	27,2	5,8
14	Oberkiefer	Molar	oral	7,4	13,5	12,0	4,7	5,6	5,7	6,7
14	Oberkiefer	Molar	vestibulär	31,3	65,4	25,2	10,1	13,1	41,4	7,0
14	Unterkiefer	Frontzahn	oral	0,76	27,2	24,3	3,4	2,2	4,7	2,2
14	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	5,4	38,3	10,3	0,28	3,1	17,1	0,90
14	Unterkiefer	Prämolar	oral	7,9	9,8	10,7	20,0	16,7	17,9	12,5
14	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	13,2	19,8	12,0	7,8	11,7	13,9	6,4
14	Unterkiefer	Molar	oral	11,8	13,2	8,2	19,1	19,9	23,6	12,5
14	Unterkiefer	Molar	vestibulär	41,3	41,9	29,6	10,9	13,3	15,0	10,2
15	Oberkiefer	Frontzahn	oral	4,2	10,3	7,9	3,5	3,7	7,0	3,4
15	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,2	11,6	1,4	0,01	0,08	0,48	0,05
15	Oberkiefer	Prämolar	oral	8,1	12,5	11,2	4,9	3,7	8,6	4,7
15	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	6,3	30,7	4,6	0,45	1,4	8,2	1,5
15	Oberkiefer	Molar	oral	8,9	10,7	10,6	5,1	5,8	15,0	10,5
15	Oberkiefer	Molar	vestibulär	17,1	63,7	13,0	3,0	3,3	22,6	3,5
15	Unterkiefer	Frontzahn	oral	3,7	11,4	6,8	10,5	1,8	2,5	3,5
15	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	18,0	34,3	4,2	9,7	0,77	3,5	0,59
15	Unterkiefer	Prämolar	oral	11,5	2,1	4,3	8,1	13,3	14,2	4,0
15	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	4,4	4,0	1,5	0,59	1,2	9,1	1,0
15	Unterkiefer	Molar	oral	12,7	4,0	14,6	11,5	14,8	19,8	10,6
15	Unterkiefer	Molar	vestibulär	14,5	16,3	8,2	8,4	8,6	21,2	7,9

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
16	Oberkiefer	Frontzahn	oral	7,2	7,6	4,8	2,2	3,3	3,3	1,7
16	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,74	13,2	1,9	0,10	0,17	0,53	0,11
16	Oberkiefer	Prämolar	oral	6,1	9,5	11,1	15,1	13,6	11,9	9,5
16	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	10,0	53,4	16,0	7,0	15,6	13,4	7,2
16	Oberkiefer	Molar	oral	0,91	5,9	11,4	9,0	9,5	8,1	6,0
16	Oberkiefer	Molar	vestibulär	13,0	65,3	47,2	9,5	15,4	12,4	6,9
16	Unterkiefer	Frontzahn	oral	5,9	3,8	10,4	6,0	26,5	14,3	6,4
16	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,2	9,3	4,8	0,19	0,62	0,99	0,21
16	Unterkiefer	Prämolar	oral	11,1	6,2	12,5	11,7	23,7	18,5	3,7
16	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	5,3	17,8	7,3	3,2	5,6	4,9	2,9
16	Unterkiefer	Molar	oral	2,5	15,8	9,8	13,2	16,7	11,8	4,5
16	Unterkiefer	Molar	vestibulär	4,9	26,3	10,9	5,9	8,3	7,6	6,3
17	Oberkiefer	Frontzahn	oral	16,3	3,7	4,4	6,5	3,2	2,3	5,2
17	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,0	1,8	0,69	0,03	0,09	0,31	0,07
17	Oberkiefer	Prämolar	oral	3,7	5,6	6,3	3,5	3,2	0,72	10,0
17	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	2,1	3,3	4,0	0,96	1,3	2,4	1,4
17	Oberkiefer	Molar	oral	3,5	3,8	7,8	2,4	2,8	1,3	3,1
17	Oberkiefer	Molar	vestibulär	20,6	8,6	42,4	9,1	10,3	5,4	7,6
17	Unterkiefer	Frontzahn	oral	3,7	2,1	19,6	1,2	2,8	15,6	2,1
17	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,55	12,9	5,1	0,11	0,29	0,01	0,06
17	Unterkiefer	Prämolar	oral	0,88	1,2	8,4	1,0	8,4	3,5	5,4
17	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	1,8	1,5	5,8	1,2	1,6	0,35	2,1
17	Unterkiefer	Molar	oral	0,92	5,7	9,3	2,0	6,0	3,9	3,6
17	Unterkiefer	Molar	vestibulär	7,9	13,1	16,4	6,9	11,1	6,7	7,3
18	Oberkiefer	Frontzahn	oral	9,7	7,4	9,2	1,9	0,99	3,4	8,8
18	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	7,3	6,0	12,6	0,44	0,54	0,46	0,36
18	Oberkiefer	Prämolar	oral	10,2	7,7	3,2	4,7	2,3	2,5	5,0
18	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	21,9	20,9	20,3	5,2	4,0	3,1	2,9
18	Oberkiefer	Molar	oral	7,3	7,5	0,91	2,0	1,9	2,5	2,0
18	Oberkiefer	Molar	vestibulär	46,4	37,5	29,2	22,9	13,4	15,3	14,1
18	Unterkiefer	Frontzahn	oral	2,0	8,9	21,7	12,2	0,64	1,6	11,9
18	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	19,3	22,9	20,4	0,08	1,5	0,37	0,16
18	Unterkiefer	Prämolar	oral	5,5	24,0	7,0	30,5	26,1	24,8	24,3
18	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	4,6	10,2	1,8	1,3	1,2	1,7	0,89
18	Unterkiefer	Molar	oral	4,8	11,5	0,11	18,0	16,3	11,9	12,7
18	Unterkiefer	Molar	vestibulär	3,0	14,2	3,4	3,7	2,1	5,1	2,3
19	Oberkiefer	Frontzahn	oral	8,6	19,9	18,6	1,8	3,7	7,5	6,6
19	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	3,0	26,9	16,9	0,02	0,05	0,42	0,06

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
19	Oberkiefer	Prämolar	oral	5,2	12,2	10,6	3,6	3,5	5,5	3,7
19	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	52,1	69,2	62,1	28,7	30,5	29,4	18,2
19	Oberkiefer	Molar	oral	7,4	10,5	11,3	1,7	1,4	2,5	2,8
19	Oberkiefer	Molar	vestibulär	66,3	72,2	67,2	60,2	44,9	48,8	36,6
19	Unterkiefer	Frontzahn	oral	5,9	44,1	53,7	30,0	23,0	43,1	25,9
19	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	7,7	30,0	24,3	0,18	0,16	4,1	0,04
19	Unterkiefer	Prämolar	oral	20,4	21,3	5,0	10,3	21,6	7,6	3,2
19	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	31,2	33,7	23,3	3,3	5,7	4,0	1,1
19	Unterkiefer	Molar	oral	14,3	14,2	2,3	9,8	10,8	7,5	3,9
19	Unterkiefer	Molar	vestibulär	37,0	33,9	26,4	16,3	7,6	14,0	5,7
20	Oberkiefer	Frontzahn	oral	21,5	12,2	46,3	1,2	2,0	2,4	3,3
20	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	7,6	19,9	12,8	0,29	0,63	0,60	0,19
20	Oberkiefer	Prämolar	oral	18,6	15,3	26,2	1,3	7,6	8,4	4,8
20	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	43,9	43,9	40,5	4,1	7,5	11,4	7,0
20	Oberkiefer	Molar	oral	11,1	16,8	23,5	5,9	10,5	9,5	10,0
20	Oberkiefer	Molar	vestibulär	29,9	51,5	26,4	10,4	11,2	17,6	8,0
20	Unterkiefer	Frontzahn	oral	10,0	17,2	0,62	0,80	2,1	3,4	0,69
20	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,9	15,7	0,31	0,76	0,71	0,39	0,57
20	Unterkiefer	Prämolar	oral	27,3	30,7	13,7	11,7	23,6	21,3	13,5
20	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	14,3	19,2	6,4	5,5	1,7	3,6	3,1
20	Unterkiefer	Molar	oral	39,0	37,7	34,8	18,2	28,8	26,6	24,3
20	Unterkiefer	Molar	vestibulär	15,4	27,8	18,7	11,3	8,5	13,0	11,7
21	Oberkiefer	Frontzahn	oral	2,2	3,1	2,7	0,11	1,1	0,53	0,77
21	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,9	40,9	5,9	0,03	0,02	0,08	0,01
21	Oberkiefer	Prämolar	oral	3,5	4,2	3,8	2,4	2,2	1,8	5,3
21	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	2,6	30,3	5,3	2,4	7,0	7,0	3,6
21	Oberkiefer	Molar	oral	5,1	2,1	3,7	5,7	7,2	7,9	9,5
21	Oberkiefer	Molar	vestibulär	3,7	19,6	7,2	4,2	6,6	4,5	4,6
21	Unterkiefer	Frontzahn	oral	5,7	45,0	18,2	17,1	10,4	10,7	11,8
21	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,6	45,4	3,9	0,19	0,31	0,48	0,03
21	Unterkiefer	Prämolar	oral	7,3	11,1	1,8	7,7	6,5	4,7	7,1
21	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	1,9	12,5	3,6	3,2	3,3	3,5	3,7
21	Unterkiefer	Molar	oral	5,6	2,2	1,1	4,0	7,8	5,8	5,7
21	Unterkiefer	Molar	vestibulär	2,7	17,7	5,3	6,5	5,4	6,0	4,9
22	Oberkiefer	Frontzahn	oral	10,8	13,7	12,0	13,3	16,5	17,7	14,7
22	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,96	11,2	0,87	0,05	0,14	0,10	0,04
22	Oberkiefer	Prämolar	oral	9,5	7,5	5,4	1,2	1,3	0,96	0,42
22	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	11,5	27,3	11,6	2,1	2,2	2,7	0,87

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
22	Oberkiefer	Molar	oral	11,7	6,9	8,0	2,2	2,9	2,6	1,3
22	Oberkiefer	Molar	vestibulär	26,2	53,6	37,9	6,6	7,9	9,1	5,7
22	Unterkiefer	Frontzahn	oral	17,1	32,6	32,6	28,9	29,7	31,9	32,5
22	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	7,3	7,7	2,8	0,46	0,58	0,33	0,22
22	Unterkiefer	Prämolar	oral	42,4	44,3	26,7	33,8	39,8	37,3	32,3
22	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	15,8	28,5	10,4	1,7	2,2	3,8	0,76
22	Unterkiefer	Molar	oral	32,0	25,1	18,7	22,5	18,3	20,2	15,6
22	Unterkiefer	Molar	vestibulär	12,1	29,3	6,1	4,6	4,6	8,8	3,6
23	Oberkiefer	Frontzahn	oral	15,2	7,6	15,6	4,9	2,5	4,6	5,2
23	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	5,8	10,3	5,0	0,10	0,38	0,63	0,05
23	Oberkiefer	Prämolar	oral	18,6	16,9	15,5	7,2	5,4	4,2	3,5
23	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	9,9	59,7	9,5	2,1	3,1	6,8	1,5
23	Oberkiefer	Molar	oral	16,1	16,7	16,2	9,1	7,2	7,7	5,7
23	Oberkiefer	Molar	vestibulär	23,1	65,5	24,5	8,9	9,9	19,5	8,0
23	Unterkiefer	Frontzahn	oral	61,3	46,3	51,5	42,1	30,0	28,5	36,2
23	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	5,4	18,2	9,7	1,5	2,3	3,2	0,42
23	Unterkiefer	Prämolar	oral	28,0	13,0	15,2	26,3	27,0	24,7	25,3
23	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	5,3	23,9	7,2	2,9	3,0	3,1	3,2
23	Unterkiefer	Molar	oral	28,7	13,4	14,1	18,1	16,6	15,3	20,1
23	Unterkiefer	Molar	vestibulär	7,5	31,3	7,4	6,9	7,0	5,0	5,0
24	Oberkiefer	Frontzahn	oral	9,3	5,6	Tne	10,4	7,3	9,2	Tne
24	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,2	2,5	Tne	0,00	0,00	0,00	Tne
24	Oberkiefer	Prämolar	oral	11,8	11,5	Tne	17,8	18,3	14,8	Tne
24	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	4,2	15,0	Tne	0,72	0,87	1,3	Tne
24	Oberkiefer	Molar	oral	7,3	7,9	Tne	12,4	10,8	8,5	Tne
24	Oberkiefer	Molar	vestibulär	6,2	46,7	Tne	3,1	3,0	4,1	Tne
24	Unterkiefer	Frontzahn	oral	18,3	7,0	Tne	13,8	4,2	5,6	Tne
24	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,3	2,7	Tne	0,00	0,02	0,02	Tne
24	Unterkiefer	Prämolar	oral	48,9	17,2	Tne	29,1	28,5	28,2	Tne
24	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	4,4	3,6	Tne	0,77	7,0	0,62	Tne
24	Unterkiefer	Molar	oral	38,6	8,9	Tne	25,6	21,6	18,5	Tne
24	Unterkiefer	Molar	vestibulär	4,8	18,3	Tne	3,7	3,0	2,7	Tne
25	Oberkiefer	Frontzahn	oral	4,9	3,4	5,5	1,8	2,2	0,45	1,7
25	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	10,0	6,6	3,4	0,59	1,5	1,6	0,30
25	Oberkiefer	Prämolar	oral	13,4	9,0	6,8	5,2	6,5	4,8	3,1
25	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	13,0	35,2	9,0	4,4	3,8	3,4	0,48
25	Oberkiefer	Molar	oral	6,8	4,9	6,8	1,2	1,3	1,4	1,2
25	Oberkiefer	Molar	vestibulär	16,4	39,7	14,2	4,9	4,4	7,2	2,3

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
25	Unterkiefer	Frontzahn	oral	0,80	11,0	9,3	15,0	8,3	10,6	9,4
25	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	20,0	19,9	6,6	9,9	2,8	2,9	2,9
25	Unterkiefer	Prämolar	oral	8,3	15,7	11,5	13,7	19,8	13,9	13,8
25	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	11,2	15,8	9,9	1,4	1,3	1,7	0,24
25	Unterkiefer	Molar	oral	6,9	18,1	16,8	18,5	21,8	22,6	18,0
25	Unterkiefer	Molar	vestibulär	15,1	21,5	14,6	5,0	5,3	2,2	2,6
26	Oberkiefer	Frontzahn	oral	1,7	4,0	1,7	0,53	2,3	1,9	1,1
26	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,1	3,0	3,4	0,02	0,39	0,02	0,07
26	Oberkiefer	Prämolar	oral	9,2	9,3	4,4	7,7	7,7	11,8	8,0
26	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	4,3	26,7	5,4	1,1	2,1	3,2	3,3
26	Oberkiefer	Molar	oral	10,5	8,8	4,7	10,5	7,9	12,6	8,7
26	Oberkiefer	Molar	vestibulär	9,4	38,9	18,2	3,0	3,6	6,7	7,0
26	Unterkiefer	Frontzahn	oral	3,9	3,4	0,02	0,50	1,3	1,3	2,1
26	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	0,63	3,3	0,18	0,16	0,33	0,00	0,09
26	Unterkiefer	Prämolar	oral	9,5	8,6	0,96	4,4	4,4	7,3	4,2
26	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	4,2	5,9	1,8	0,76	0,34	2,5	0,55
26	Unterkiefer	Molar	oral	7,8	8,5	1,4	4,9	4,9	5,7	4,9
26	Unterkiefer	Molar	vestibulär	8,9	18,4	4,1	1,5	1,5	4,3	2,5
27	Oberkiefer	Frontzahn	oral	9,3	6,4	5,8	6,9	5,6	3,9	2,4
27	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,4	6,6	2,8	0,51	0,39	0,31	0,27
27	Oberkiefer	Prämolar	oral	10,9	13,5	13,4	6,7	7,7	7,9	7,8
27	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	18,7	53,7	13,6	3,0	4,2	7,1	1,9
27	Oberkiefer	Molar	oral	8,9	10,6	11,6	6,0	5,8	4,7	7,7
27	Oberkiefer	Molar	vestibulär	31,1	62,5	31,4	2,7	3,6	4,8	2,8
27	Unterkiefer	Frontzahn	oral	13,7	7,9	7,9	7,6	5,3	4,1	4,1
27	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	13,1	11,7	8,1	0,81	1,4	0,10	0,31
27	Unterkiefer	Prämolar	oral	19,0	18,4	13,0	20,6	17,6	17,0	13,6
27	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	12,7	21,4	5,2	3,4	3,6	3,3	2,3
27	Unterkiefer	Molar	oral	11,9	8,5	7,4	8,2	7,1	6,7	6,3
27	Unterkiefer	Molar	vestibulär	10,9	25,2	7,7	3,5	3,4	3,4	1,9
28	Oberkiefer	Frontzahn	oral	8,1	7,0	9,2	0,98	1,8	1,7	1,7
28	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	3,1	6,5	3,3	0,00	0,01	0,00	0,01
28	Oberkiefer	Prämolar	oral	12,8	14,0	9,3	11,3	11,3	14,6	14,6
28	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	7,3	42,1	5,4	2,0	3,8	1,7	1,7
28	Oberkiefer	Molar	oral	12,3	9,6	6,0	21,4	21,9	22,3	20,8
28	Oberkiefer	Molar	vestibulär	10,4	52,4	9,5	3,4	6,0	3,5	2,6
28	Unterkiefer	Frontzahn	oral	61,4	55,6	72,3	29,9	13,4	18,3	36,4
28	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	4,8	10,6	1,8	0,37	0,39	0,39	0,06

Proband/ -in	Kiefer	Zahn	Fläche	konv.			QLF-D			
				T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
28	Unterkiefer	Prämolar	oral	20,7	10,6	3,7	19,7	16,3	16,5	11,7
28	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	5,0	7,2	3,1	3,5	3,6	1,8	2,5
28	Unterkiefer	Molar	oral	18,1	6,3	2,9	14,5	10,7	9,4	8,4
28	Unterkiefer	Molar	vestibulär	8,9	15,7	5,2	7,6	8,3	5,1	6,6
29	Oberkiefer	Frontzahn	oral	2,7	1,0	3,8	0,16	1,9	0,36	1,3
29	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,3	12,8	2,3	0,08	0,21	0,07	0,25
29	Oberkiefer	Prämolar	oral	5,8	6,0	5,7	0,91	3,2	1,9	6,6
29	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	16,5	51,6	16,8	1,4	1,4	2,2	2,5
29	Oberkiefer	Molar	oral	7,4	8,9	4,5	0,64	2,4	2,2	3,9
29	Oberkiefer	Molar	vestibulär	30,9	63,3	29,1	12,5	10,7	11,5	11,5
29	Unterkiefer	Frontzahn	oral	17,4	15,5	4,4	3,2	2,0	1,7	2,0
29	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	1,7	3,5	1,9	0,05	0,05	0,03	0,05
29	Unterkiefer	Prämolar	oral	15,0	13,2	2,0	5,8	3,6	2,9	9,5
29	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	5,7	6,8	8,6	2,0	2,7	1,9	2,2
29	Unterkiefer	Molar	oral	13,4	10,9	2,6	11,2	10,8	7,2	13,2
29	Unterkiefer	Molar	vestibulär	14,9	17,6	16,9	9,5	9,4	10,3	10,6
30	Oberkiefer	Frontzahn	oral	2,5	4,2	3,1	0,49	1,4	2,3	1,8
30	Oberkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,2	6,2	6,4	0,01	0,19	0,08	0,04
30	Oberkiefer	Prämolar	oral	15,7	16,4	14,9	3,8	6,1	14,4	10,0
30	Oberkiefer	Prämolar	vestibulär	10,6	32,8	8,9	2,0	4,6	5,4	1,5
30	Oberkiefer	Molar	oral	9,2	10,6	11,0	0,58	3,4	6,2	2,6
30	Oberkiefer	Molar	vestibulär	9,6	38,1	12,0	1,7	3,6	5,9	2,3
30	Unterkiefer	Frontzahn	oral	4,1	9,4	4,7	1,2	1,5	1,8	1,2
30	Unterkiefer	Frontzahn	vestibulär	2,4	7,0	8,9	0,33	0,15	1,1	0,46
30	Unterkiefer	Prämolar	oral	22,7	16,0	14,5	8,8	17,4	16,1	7,7
30	Unterkiefer	Prämolar	vestibulär	7,1	3,3	5,8	3,2	2,8	3,6	1,3
30	Unterkiefer	Molar	oral	7,2	7,6	2,8	4,0	8,3	7,7	3,9
30	Unterkiefer	Molar	vestibulär	8,6	12,0	8,3	4,9	6,7	4,6	3,6

9.2 Ablauf der planimetrischen Auswertung

1. Einheitliche Sortierung der Rohdaten nach Aufnahmesituationen
2. Vorverarbeitung in Adobe Photoshop Lightroom 5.7.1
 - a. Import im Rohdatenformat
 - b. Export ins JPEG-Format in Standardeinstellungen
 - c. Graustufenkonvertierung durch Anwendung einer der Aufnahmesituation entsprechenden Entwicklungsvorgabe
 - d. Export ins JPEG-Format in Graustufen
3. Flächenauswahl mit ImageJ 1.47q-Makro
 - a. Festlegung der Flächenanzahl pro Foto
 - b. Starten des Auswahl-Moduls
 - c. Auswahl des Verzeichnisses der Daten in Standardeinstellungen
 - d. Erfassung der Region of Interest (ROI) für die festgelegten Flächen sämtlicher Fotos
4. Kopie der ROI-Daten ins Verzeichnis der Daten in Graustufen
5. Quantitative Auswertung mit ImageJ 1.47q-Makro
 - a. Starten des Auswertungs-Moduls
 - b. Festlegung der Graustufengrenzwerte
 - Fluoreszenzfoto: 180
 - Konv. Foto nach Anfärben: 90
 - c. Auswahl des Verzeichnisses der Daten in Graustufen
 - d. Automatische Erkennung der ROIs pro Foto
 - e. Histogrammäquilisation innerhalb der ROI*
 - f. Identifikation der Gesamtpixelanzahl innerhalb der ROI*
 - g. Speicherung der ROI im JPEG-Format*
 - h. Identifikation der Pixelanzahl im festgelegten Graustufenbereich innerhalb der ROI*
 - i. Berechnung des Zielkriteriums (prozentuale Bedeckung der Vestibulär-/Oralfläche des jeweiligen Zahnes mit Plaque)
 - j. Speicherung der Visualisierung im JPEG-Format*
 - k. Ausgabe in Tabellenform (Excel-Format)
6. Datenmodulation in Excel für Mac 2011

*für jede ROI

9.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grade des T-QHI	9
Abbildung 2: Grade des OHI-S	10
Abbildung 3: Altersverteilung	24
Abbildung 4: Fluoreszenzfotos der Zähne 25 und 26 von vestibulär zu den verschiedenen Untersuchungszeitpunkten	27
Abbildung 5: Versuchsaufbau im Fotoraum.....	28
Abbildung 6: Aufnahmen der Frontzähne	29
Abbildung 7: Aufnahmen der Seitenzähne	30
Abbildung 8: Auswahl der gewünschten Makrofunktion	33
Abbildung 9: Information zur auszuwählenden Fläche	34
Abbildung 10: Grenzwertfestlegung.....	34
Abbildung 11: Flächenanalyse bei Zahn 16 (konventionelles Foto nach Anfärben)....	35
Abbildung 12: Flächenanalyse bei Zahn 16 (Fluoreszenzfoto).....	36
Abbildung 13: Makro zur auto-matisierten Datenmodulation	36
Abbildung 14: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 bei konventioneller Messung nach Anfärben	43
Abbildung 15: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 bei Fluoreszenzmessung	46
Abbildung 16: Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Methoden zu T1, T3 und T4	49
Abbildung 17: Bland-Altman-Plot zu T1, alle Messwerte.....	52
Abbildung 18: Bland-Altman-Plot zu T3, alle Messwerte.....	52
Abbildung 19: Bland-Altman-Plot zu T4, alle Messwerte.....	53
Abbildung 20: Bland-Altman-Plot der Oralflächen zu T1, Plaquebedeckung ≤10% bei konventioneller Messung nach Anfärben	54
Abbildung 21: Bland-Altman-Plot der Vestibulärflächen zu T1, Plaquebedeckung ≤10% bei konventioneller Messung nach Anfärben	55
Abbildung 22: Auswertung mit QA2 1.05.....	57
Abbildung 23: Auswirkung von Verfärbungen bei der Auswertung.....	65

9.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht wichtiger Mikroorganismen in der Mundhöhle	8
Tabelle 2: Plaquebedeckung (%) bei Fluoreszenz- und konventionellen Fotos nach zweifacher Auswertung durch zwei Untersucher/-innen	40
Tabelle 3: Plaquebedeckung nach Mehrfachauswertung von je zwei Serien Fluoreszenz- und konventioneller Fotos	41
Tabelle 4: Plaquebedeckung bei Fluoreszenz-messung nach professioneller Zahnreinigung	42
Tabelle 5: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 nach Fläche bei konventioneller Messung nach Anfärben	44
Tabelle 6: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 nach Fläche und Kiefer bei konventioneller Messung nach Anfärben	44
Tabelle 7: Plaquebedeckung zu T1, T3 und T4 nach Fläche, Kiefer und Zahn bei konventioneller Messung nach Anfärben	45
Tabelle 8: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 nach Fläche bei Fluoreszenzmessung	47
Tabelle 9: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 nach Fläche und Kiefer bei Fluoreszenzmessung	47
Tabelle 10: Plaquebedeckung zu T1, T2, T3 und T4 nach Fläche, Kiefer und Zahn bei Fluoreszenzmessung	48
Tabelle 11: Gegenüberstellung der Messergebnisse beider Methoden	50
Tabelle 12: Korrelationskoeffizienten zwischen den Messmethoden	53
Tabelle 13: Plaquebedeckung in Einzelwerten (%)	81

10 Ehrenwörtliche Erklärung

„Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne unzulässige Hilfe oder Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nichtveröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten sowie ethische, datenschutzrechtliche und tierschutzrechtliche Grundsätze befolgt. Ich versichere, dass Dritte von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten haben, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen, oder habe diese nachstehend spezifiziert. Die vorgelegte Arbeit wurde weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zweck einer Promotion oder eines anderen Prüfungsverfahrens vorgelegt. Alles aus anderen Quellen und von anderen Personen übernommene Material, das in der Arbeit verwendet wurde oder auf das direkt Bezug genommen wird, wurde als solches kenntlich gemacht. Insbesondere wurden alle Personen genannt, die direkt und indirekt an der Entstehung der vorliegenden Arbeit beteiligt waren. Mit der Überprüfung meiner Arbeit durch eine Plagiatserkennungssoftware bzw. ein internetbasiertes Softwareprogramm erkläre ich mich einverstanden.“

Ort, Datum

Unterschrift

11 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr. Carolina Ganß für die Überlassung des Themas und für die in allen Belangen erstklassige Betreuung und die stets hilfreichen, freundlichen und unkomplizierten Diskussionen und Anregungen während der Erstellung dieser Dissertation.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. Sabine Ruf als Mitbetreuerin der Arbeitsgruppe für die Unterstützung des Projekts.

Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr. Joachim Klimek für die Betreuung und Unterstützung in der ersten Phase der Arbeit danken.

Frau Prof. Dr. Nadine Schlüter und Herrn Dr. Tobias Winterfeld danke ich für die Unterstützung durch zahlreiche Anregungen und motivierende Gespräche.

Von ganzem Herzen danke ich Tabea, meiner Ehefrau und Weggefährtin in diesem Projekt, für die unermüdliche Unterstützung und Motivation.

Ebenso danke ich meiner Familie für die Unterstützung in allen Situationen meines Studiums und Werdeganges.